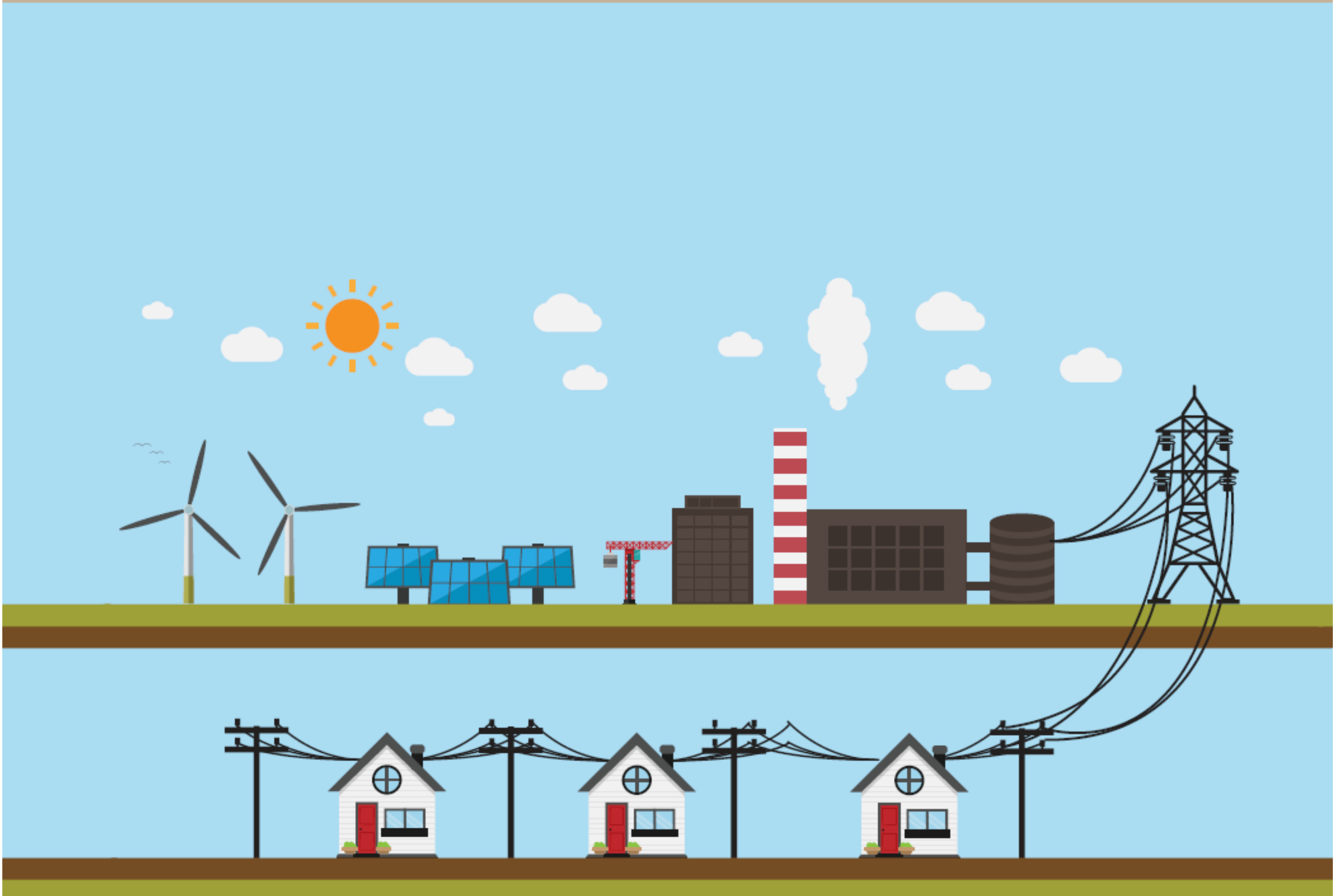
هندسة القوى الكهربية

دراسات في توليد و نقل و توزيع الطاقة الكهربية



أ. د. محمود جيلاني

كلية الهندسة – جامعة القاهرة

بسم الله الرحمن الرحيم

هندسة القوى الكهربية

دراسات فى توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربية

أ.د . محمود جيلانى

الأستاذ بكلية الهندسة –جامعة القاهرة

الطبعة الأولى 2016

وقف لله تعالى

المقدمة

هذا الكتاب كتبته لأفهم ما صعب على فهمه من مواضيع القوى الكهربية ، وربما هذا ما يفسر لك نوعية الموضوعات التى درست فى كل فصل ، فهى لا تشبه الكتب التقليدية فى هذا المجال ، فلست بصدد مجرد جمع معلومات عن كل موضوع ، وإنما كان هدفى الأول هو توضيح الرؤية الشاملة للموضوع ، ثم أن أفسر لنفسى ما كان يصعب على فهمه حين كنت طالبا ، أو حتى بعد تخرجى من موضوعات القوى الكهربية.

ما هى منظومة القوى الكهربية ؟

تتكون هذه المنظومة من ثلاثة منظومات أساسية وهي:

1- **منظومة توليد القدرة الكهربية** (GENERATION SYSTEM) وهى المنظومة التى تشتمل عند دراستها على عدة موضوعات من أهمها : الشبكات الموحدة ، والتحكم فى القدرة المولدة ، و أنواع المحطات.

2- **منظومة نقل القدرة الكهربية** (TRANSMISSION SYSTEM) وهذه المنظومة تنقسم إلى قسمين : الشبكات الهوائية Overhead Transmission System **والكابلات الأرضية Underground Cables** . والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بالموضوعات من قبيل دراسة أنواع الموصلات وأنواع العوازل وأعطال الكابلات واختباراتها ، وحسابات القدرة الفعالة المنقولة ، وكذلك دراسة تأثير القدرة الغير فعالة Reactive Power وعلاقتها بتغير وثبات الجهد فى الشبكات

3- **منظومة توزيع القدرة الكهربية** (DISTRIBUTION SYSTEM) وتختص هذه المنظومة بنقل الطاقة إلى المستهلكين من خلال شبكة الجهد المتوسط وأيضا شبكة الجهد المنخفض. والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بالموضوعات الكثيرة المتعلقة بتخطيط شبكات التوزيع ومكونات شبكة التوزيع ، وأنظمة التوزيع والتحكم الجديدة إلخ.

وينظم عمل هذه المنظومات الثلاثة مجموعة من المنظومات الفرعية وهي منظومة الحماية ، ومنظومة التحكم ، ومنظومة القياس ، وشبكة الاتصالات.

وتعتبر **محطات التحويل Substations** بمثابة مفاصل الربط الأساسية بين المنظومات الثلاثة حيث تتواجد بداخلها المنظومات المساعدة السابقة (الحماية – القياس – الاتصالات – والتحكم).

وبالطبع فكل المنظومات تتعاون معا للوصول إلى جودة الخدمة المطلوبة ، مع التحقق من **استقرار الشبكة** (**Power System Stability**) ، والتى يقصد بها مدى قدرة الشبكة على سرعة استعادة القيم الطبيعية للتشغيل (سواء للتردد أو للجهد) بعد حدوث هزات بالشبكة سواء كانت هذه الهزات بسيطة أو هزات ضخمة.

وهذا الكتاب مكون من ستة أبواب ، تغطى أهم الموضوعات التى يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربية. وقد أشرت لعناوين هذه الأبواب ضمن المقدمة السابقة وذلك بخط أكبر نسبيا ، علما بأن المنظومات الفرعية تم الحديث عنها أيضا ضمن أبواب الكتاب.

لمن هذا الكتاب؟

هذا الكتاب كتب أساساً للمهندسى الكهرباء العاملين فى هذا المجال ، و لطلاب أقسام الكهرباء سواء فى الجامعة أو ما يعادله من التعليم التطبيقى والفنى ، والموضوعات فيه تناسب جميع السنوات ، فبعض الأبواب مثل الباب الأول والرابع تناسب طلاب السنوات الأولى ، والبعض مثل الباب الثانى والثالث تناسب السنوات المتقدمة .

ونظراً لأهمية الموضوع فقد روعي في أسلوب كتابته أن يكون مبسطاً من غير إخلال بعمق الدراسة ، كما أن كتابته باللغة العربية جعلته أيضاً مناسباً لقطاع عريض من الفنيين المتخصصين الباحثين عن فهم أساسيات ما يقومون به دون معوق من لغة أو تعقيد في الشرح.

ماذا ينقص هذا الكتاب؟

هذا الكتاب ربما يكون الأول باللغة العربية فى تنوع مجالاته ، وكبر حجمه (الكتاب تجاوز الثمانمئة صفحة) ، وأسلوبه فى تناول الموضوعات ، والمزج بين الجانب الأكاديمى والجانب العملى فى الشرح.

ومع ذلك فليس كل أحد سيجد فيه غايته الكاملة .

- فالطالب سيجد أن الأمثلة المحلولة فيه قليلة. (أخذت بعضا منها من كتاب V.K. Mehta ويمكن الرجوع إليه ، ويمكن أيضا الرجوع لكتاب Theraja لمزيد من الأمثلة المحلولة ، وهما من أفضل الكتب التى تقدم أمثلة محلولة تفيد الطالب .
- و المهندس فى المحطات سيجد أن الكتاب ينقصه التفاصيل العملية للتوصيلات ، وشرح تشغيل المعدات بالتفصيل إلخ. ويمكنه الرجوع للكتالوجات أو إلى مفات موجودة على منتديات القوى الكهربية تشرح هذه الأمور ، وتعالج هذه النقطة.

- والأستاذ الجامعى سيجد الكتاب ينقصه المعادلات الرياضية التفصيلية التى يمكن للطالب من خلالها فهم بعض القضايا مثل دراسات الـ Transients الواردة فى الباب الأخير ، ومثل حسابات الـ TL Parameters فى الباب الثانى مثلا. والحق أن تعمدت التقليل من هذه المعادلات ، لأن أغلب المراجع تستخدم هذا الأسلوب فى الشرح ، ولن أقدم جديدا إذا سرت على نفس المنوال ، ولكنى فضلت التفكير المنطقى لتحليل المشاكل. وعموما يمكن استكمال هذا الجانب بالرجوع لمراجع التى تهتم بهذا الجانب مثل الموجودة فى قائمة المراجع الأجنبية.
- و الطلاب من بعض الدول العربية سيجد مشكلة عدم استخدام اللغة العربية فى كافة المواضع ، وسيجد أنى اعتمد على المصطلح الإنجليزى كثيرا بدلا من ترجمته. وهذه المشكلة قد يعانى منها بالفعل بعض القراء ، لكنى وجدت أن شيوع المصطلحات الإنجليزية جعلت كثير من العاملين فى المجال يفضلون التعامل بالمصطلح الإنجليزي ، و ربما لا يفهمون الترجمة العربية للمصطلح ، وهذا واقع يجب الاعتراف به ، ولذ فقد استخدمت الترجمة العربية للمصطلحات الأجنبية فقط فى مواضع قليلة من الكتاب ، والتزمت بذكر المصطلح باللغة الإنجليزية مباشرة – وبدون ترجمة – فى أغلب صفحات الكتاب. وعالجت هذه المشكلة جزئيا بعمل قاموس فى نهاية الكتاب للمصطلحات الأجنبية التى اساتخدمها أحيانا دون ترجمة.
- ينقص هذا الكتاب أيضا وضع المراجع التفصيلية لكل الأجزاء أولا بأول ، والسبب فى ذلك يرجع إلى أنى منذ البداية عزمت على كتابة المراجع مجمعة فى نهاية الكتاب كما فى الكتب السابقة ، ولكن وجدت ملاحظات كثيرة من بعض الاساتذة أثناء المراجعة تطلب منى وضع المراجع مع كل جزئية ، ورغم اقتناعى بوجهة نظر هؤلاء الأساتذة والزملاء إلا أن الوقت قد فات لتدارك هذا الأمر ، فالكتاب استغرق إعداده وكتابته عدة سنوات ، ورجعت خلالها إلى عشرات إن لم تكن مئات المراجع ، وللأسف فات الوقت لأتذكر المرجع الخاص ببعض الجزئيات ومن ثم ظلت هذه السلبية باقية ، وأن كانت المراجع فى نهاية الكتاب تمثل أهم المراجع فعلا التى استفدت منها بدرجة كبيرة.
- أخيرا ، سيجد البعض أن هناك موضوعات لم يتم التطرق إليها فى هذا الكتاب رغم أهميتها القصوى ، على سبيل المثال فإن الباب الثالث يتناول محطات التحويل الكهربية ولا يوجد فيه أى حديث عن محولات القوى الكهربية التى هى عصب هذه المحطات ، كما أن الكتاب يخلو من الحديث عن نظم الحماية الكهربية. وظنى أن من سيرى هذا النقص فى الكتاب هم فقط من لم يطلعوا على الكتب السابقة التى كتبتها منذ سنوات (كتاب المرجع فى محولات القوى الكهربية ، وكتاب نظم الحماية الكهربية ، وكتاب المرجع فى التركيبات والتصميمات الكهربية) . فقد خصصت كتابا منفصلا لمحولات القوى الكهربية ، وكتابا منفصلا لنظم الوقاية ، وبالطبع أشرت إلى الرجوع إليهم فى ثنايا الكتاب.

وإن كنت أجد للبعض عذرا خاصة فيما يتعلق بنظم الحماية التى أجد أن كتابى : نظم الحماية الكهربية ، علم وفن ، يحتاج لبعض الإضافات ، وإن شاء الله لو بقى لى عمر سأكتب نسخة معدلة من كتاب نظم الحماية الكهربية ، تعالج كثيرا من أوجه النقص فيه ، خاصة أنه كان أول كتاب أكتبه.

وأختم مقدمة هذا الكتاب بما ختمت به مقدمة الكتاب الأول ، وهو حديث رسول الله ﷺ :

إذا مات ابن آدم انقطع عمله إلا من ثلاث: صدقة جارية ، أو علم ينتفع به ، أو ولد صالح يدعو له.

أسأل الله أن تتحقق فى هذا الكتاب المعانى الثلاثة.

تصدير



فى أواخر عام 1992 كنت على موعد مع مناقشة رسالة الدكتوراه الخاصة بى ، وكانت فى مجال الوقاية الرقمية Digital Protection ، وكنت دارسا بجامعة كالجرى بمقاطعة ألبرتا بكندا تحت إشراف أستاذى الكبير Om Parakash MALIK.

وقد جلست معه فى ذلك الوقت لنتفق على أسماء الممتحنيين ، وكانت المشكلة فى الممتحن الخارجى ، وكان رأي الدكتور مالك صادما لى ، إذ رشح لى البروفسور Mohindar S. Sachdev الأستاذ بجامعة Saskatoon ، ولمن لا يعرف هذا الاسم يكفى أن يتابع منشورات الـ IEEE ليكتشف أن هذا الأستاذ هو رقم واحد فى العالم فى مجال الـ Digital Protection ، وكنت قبل هذا الاجتماع بشهور قد حضرت معه دورة لمدة أسبوع فى موضوع الجديد فى عالم الـ Digital Protection ، و كان هو المحاضر الأساسي فى هذه الدورة ، ومعه تلميذه النجيب الذى صار الآن واحدا من ألمع الأساتذة فى مجال الوقاية الرقمية ، وهو البروفسور Dr. Tarlochan Sidhu ، (الأساتذة الثلاثة من الهند) . وكنت خلال الدورة مبهورا بأسلوبهما وغزارة علمهما ، وأدركت حينها لماذا اختارت الـ IEEE البروفسور Sashdev ليكون هو المنسق لأشهر Two Tutorials فى مجال الـ Digital Protection ، ولكن أن يكون هو ممتحنا لى فى الدكتوراه فكان شئ آخر ، ولكن لم يسعنى أن أعترض على اختيار د مالك .

وجاء يوم المناقشة ، وقدمه الدكتور مالك ليبدأ الأسئلة ، وكنت متوقعا أن يبدأ بسؤالى فى أهمية موضوع الرسالة ، ففوجئت به يصدمنى بأول سؤال ، وكان سؤالا عاما فى موضوع الوقاية الرقمية لا علاقة له بالرسالة ، وكان السؤال تحديدا هو : Digital Protection is a digital Filter. Explain ، وبالطبع أخذتنى الصدمة من هذا السؤال الأول ، ولم تحضرنى أى إجابة ، فقلت فى نفسى لماذا لا أستعمل معه خطة الطلبة لدينا فى مصر حين لا يعرف أحدهم إجابة السؤال فيلف ويدور فى الحديث حول الموضوع ويسترسل حتى يظن المستمع أن هذا الطالب بحر علم ، ولكن الخطة فشلت ، والرجل فى كل مرة يتركنى أسرح ماشئت فى الكلام ثم أفاجأ به يقول لكنك لم تجب على السؤال ويعيده بنصه مرة أخرى ، وبدا الارتباك واضحا على ، فتتدخل د مالك بصرامة ، ووجه الكلام للبروفسور Sashdev فى جملة واضحة : Mohendar ، That is enoug .

فالدكتور مالك تدخل بقوة ليدافع عن تلميذه حتى لا أفقد تركيزى تماما ، وطلب تغيير السؤال إلى وجهة جديدة ، وكان البوفسور Sashdev لا يقل احترافية عن أستاذى فبدأ يسألنى أسئلة فى موضوع الرسالة وترك الأسئلة الكبيرة ، لأنه من واقع إجابتى عن السؤال الأول عرف أن الواقف أمامه طالب دكتوراه عادى ليس بهذا التميز الذى ظنه من قراءته للرسالة.

لماذا أبدأ الكتاب بهذه القصة؟

فى اليوم التالى بعد انتهاء المناقشة استدعانى د. مالك منفردا لمكتبه ، وهو الذى كان بالأمس ينافح عنى ، ففوجئت به يعاتبى على إسلوبى فى الرد على السؤال الأول ، وقال تحديدا لماذا تخجل أن تقول لا أعرف.

وتذكرت الإمام مالك بن أنس رحمه الله حين سئل عن مائة مسألة فأجاب عن عشرة وقال فى الباقى لا أعلم ، فقال له السائل : وماذا أقول للناس الذين أرسلونى إليك لأسألك ؟ فقال فى ثقة : قل لهم مالك بن أنس إمام دار الهجرة لا يعرف.

تعلمت هذا الدرس ، وأصبحت من وقتها ليس فقط لا أخجل أن أقول لطالب يسألنى فى المحاضرة سؤالا ما فأقول له لا أعرف ، بل صار أحب شئ إلى أن يسألنى الطالب سؤالا لا أعرفه حتى أبحث عن إجابته وأرجع فأفيد الطلبة بمعلومة كنت أنا وهم لا نعرفها.

وهذا الكتاب نتاج هذه المدرسة ، مدرسة الطلاب المميزين الذين يجلسون فى المحاضرة ويسألون بعمق ، ونتاج أستاذ يعرف أن منبع العلم هو السؤال ، فكان هؤلاء الطلاب المميزين خلال سنوات عملى فى هندسة القاهرة أو فى كلية الدراسات التكنولوجية بالكويت أو خلال عملى بالجامعة الأمريكية بالقاهرة هم أصحاب هذا الكتاب ، وكل معلومة جديدة فيه أصلها لهؤلاء الطلاب.

شكر وتقدير

لا أبالغ إن قلت أن أشد ما يميز هذا الكتاب هو فريق المراجعة ، فقد تعاون معى فى مراجعة هذا الكتاب:

1- العديد من أســاتذتى بهندســة القاهرة ، الذين شــارك كل منهم فى مراجعة جزء من الكتاب ، منهم أ.د حسين أنيس ، و أ.د زينب هانم عثمان ، وأ.د عصام أبو الذهب ، أ.د حسام كمال ، مع شكر خاص لـ أ.د دعاء خليل ، التى راجعت بعناية ودقة جميع فصول الكتاب.
2- وقد شارك فى المراجعة أساتذة كبار من جامعات أخرى ، منهم أ.د مصطفى عيسي (هندسة حلوان) ، أ.د نبيل عباسي (هندسة الاسكندرية) ، أ.د تامر كوادى (هندسة المنوفية) ، أ.د سعيد المصرى (هندسة حلوان) ، أ.د أمل عبد الجواد (هندسة الزقازيق).
3- ومن أهم فئات المراجعين لهذا الكتاب نخبة مميزة من كبار المهندسين العاملين بقطاعات وزارة الكهرباء المختلفة فى مصر ودول الخليج ، منهم م موسى سعيد أبو خطوة رئيس قطاع الوقاية بشركة توزيع وسط الدلتا ، م كامل بدرخان كبير مفتشى الكابلات الكهربية بشركة النقل السعودية ، م أحمد نصر (شركة الفنار السعودية) .
4- وبالطبع كعادته فى كل الكتب السابقة فقد قام بالمراجعة أخى م سيد سعد صاحب المنتدى المشهور والصديق القديم ، وكذلك المهندسة المميزة م شامية الزونة شريكته فى الحياة وفى إدارة الموقع.
5- وشاركت أيضا مجموعة رائعة من المهندسين فى مصر من ذوى الخبرات العملية ، و كل واحد منهم له مجال تخصصى مختلف وبيئة عمل مختلفة ، منهم م أحمد الرفاعى (محطة غرب القاهرة) ، وم أحمد فؤاد (شركة النقل المصرية) و م حسام صبرة و م أحمد الحناوى (شركة توزيع جنوب القاهرة) ، والمهندس الاستشارى عبد الله الطوخى (شركة سمارت المتخصصة فى تصميم محطات التحويل) ، وكان لكل منهم جهد مميز فى المراجعة والإضافات.

6- وأجدنى أختم سجل الشكر والتقدير باثنين من كبار الأساتذة فى مصر ، توفيا إلى رحمة الله ، وكانا ممن يسعيان بحماس لمراجعة الكتاب ، هما : أ.د محمد مصطفى سلام (رحمه الله) الأستاذ بجامعة حلوان وقد ناقشت معه بعضا من نقاط الباب السادس فى الكتاب ، وأ.د رشدى رضوان أستاذى بهندسة القاهرة ، الذى طلب منى أن أطبع له باب المحطات ليراجعه مكتوبا ، و لكنه توفى قبل أن يستلمه منى بيوم واحد. رحمهما الله رحمة واسعة.

7- شكر خاص لفنان غير مشهور : يوسف محمود جيلانى (14 سنة) على تصميم الغلاف.

المحتويات

Contents

ما هى منظومة القوى الكهربية ؟........................... .... ت

لمن هذا الكتاب؟.............................. .... ث

ماذا ينقص هذا الكتاب؟.............................. .... ث

أهم مصادر الطاقة.............................. 2

علم الطاقة 3

وحدات قياس الطاقة 4

تصنيف محطات التوليد الكهربية.............................. 5

فصول هذا الباب.............................. 6

1 8

1.1 تاريخ الشبكات الموحدة 8

1.1.1 الشبكات الكهربية الموحدة... 9

1.1.2 الربط الكهربى بين الدول العربية... 9

1.1.3 نماذج للشبكات الموحدة... 13

1.1.4 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية... 20

1.1.5 الفقد فى الشبكات... 20

1.1.6 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟... 21

1.1.7 ما المقصود بالــ Spinning Reserve ؟ 25

1.2 كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟...................... 25

1.2.1 التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال 26

1.2.2 كيف يحدث الــ Blackout ؟ 27

1.2.3 خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration 27

1.3 طرق التحكم في التردد : 28

1.3.1 لماذا الخوف من تغير التردد؟... 28

1.3.2 لماذا نستخدم نظام الــ 50 أو 60 هيرتز؟... 28

1.3.3 استخدام الــمنظم Governor فى التحكم فى التردد... 29

1.3.4 طريقة عمل الـــ Governor فى المحطات البخارية: 29
1.3.5 أنواع الـــ Governor : 30
1.4 ربط المولدات على التوازي بالشبكة 31
1.4.1 ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟ 32
1.4.2 شروط تحقق تزامن المولدات: 32
1.5 خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا 34
1.5.1 الخطوة الأولي: ضبط السرعة 34
1.5.2 الخطوة الثانية: ضبط الجهد 34
1.5.3 الخطوة الثالثة : ضبط الـــ phase sequence 35
1.5.4 الخطوة الرابعة : ضبط الـــ phase shift 35
1.5.5 الطريقة الآلية:(Automatic method) 35
1.5.6 ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟ 36
1.6 توزيع القدرة بين المولدات فى الشبكة LOAD SHARING 37
1.6.1 توزيع القدرة الفعالة بين المولدات 38
1.6.2 توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات 40
2 54
2.1 أساسيات المحطات البخارية 55
2.2 الدورة البخارية 56
2.2.1 اختيار مواقع المحطات البخارية 57
2.2.2 كفاءة المحطات البخارية 57
2.2.3 الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية 58
2.2.4 نظرية عمل القسم الكيميائي: 59
2.2.5 تحسين معامل الـــ PH للماء 60
2.2.6 ما هو الرقم الهيدروجينى PH ؟ 60
2.2.7 إختبارات القسم الكيميائى 60
2.3 الغلاية (BOILER) 62
2.3.1 الفرن (Furnace) 63
2.3.2 الدرم(Drum) 64
2.3.3 الموفّر (Economizer) 64
2.3.4 المسخنات (Heaters) 65
2.3.5 وظيفة الـــ Dearator 66
2.3.6 المدخنة Chimney 66
2.3.7 الآلات والمعدات المساعدة فى المحطة 67
2.4 التربينة (TURBINE) 68

2.4.1 نظام التزييت فى التربينة 69
2.4.2 عملية تدوير التربينة 69
2.5 المكثف (CONDENSER) 70
2.6 الدورة البخارية تفصيليا 72
2.6.1 فصل الوحدة 74
2.7 مكونات محطات التوليد الغازية : 76
2.7.1 الكباس الرئيسي للوحدة 76
ملحوظة: 77
2.7.2 صمامات نزف الهواء BLOW OFF VALVES 77
2.7.3 غرفة الاحتراق 77
2.7.4 التربينة الغازية 78
2.7.5 المولد الكهربي 79
2.7.6 الآلآت والمعدات المساعدة للتربينة الغازية 79
2.7.7 طريقة البدء فى المحطات الغازية 80
2.8 فكرة عمل الدورة المركبة COMBINED CYCLE 83
2.8.1 وحدة الــ HRSG: 84
2.8.2 كفاءة محطات الدورة المركبة: 85
2.8.3 مزايا محطات الدورة المركبة: 85
2.8.4 أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر: 86
3 89
3.1 مكونات المولد الكهربى 90
3.1.1 العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor 91
3.1.2 منظومة التبريد 93
3.1.3 كيف يتم توليد المجال المغناطيسي؟ 94
3.1.4 العناصر المرتبطة بمنظومة الــ Excitation 94
3.1.5 كيف يتم التحكم أتوماتيكيا فى قيمة الجهد؟ 95
3.1.6 الجيل الجديد من المولدات 96
3.2 المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد 99
3.3 الغرف والعنابر الرئيسية بمحطة التوليد 100
3.4 منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد 101
3.4.1 خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة Power Center 101
3.4.2 خلايا الجهد المنخفض Motor Control Center 101
3.4.3 غرفة الشواحن والبطاريات : 102

3.5 المنظومات المساعدة فى القسم الكهربى AUXILILARY SYSTEMS.. 104
3.5.1 منظومة الاتصالات(COMMUNICATION SYSTEM) 104
3.5.2 نظام التحكم(CONTROL SYSTEM) 104
3.5.3 منظومة الحماية:- (PROTECTION SYSTEM) 105
3.6 مكونات النظام الكهربي: 106
3.6.1 كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربية: 107
4 111
4.1 طاقة الربط النووي 111
4.1.1 فكرة الطاقة النووية.. 113
4.1.2 تحقيق قانون أينشتاين 115
4.1.3 تخصيب اليورانيوم 115
4.2 مكونات المفاعل النووي................................ 116
4.2.1 مخاطر المفاعلات 118
4.2.2 هل المفاعلات النووية يمكن أن تنفجر كالقنابل؟... 119
4.2.1 ما هو الماء الثقيل؟.. 119
4.2.2 ما هو مفاعل كندو؟.. 120
5 124
5.1 محطات التوليد المائية 126
5.1.1 طريقة توليد الطاقة الكهرومائية.. 126
5.1.2 نظرية العمل... 128
5.1.3 ما هو الارتفاع الحرج ؟.. 129
5.1.4 محطات الضخ والتخزين 130
6 132
6.1 قواعد أساسية فى الطاقة الشمسية 134
6.1.1 لماذا يكون الصيف أعلى فى درجة الحرارة؟.. 134
6.1.2 إلى أى جهة توجه الألواح الشمسية؟.. 135
6.2 الاستفادة من الطاقة الشمسية فى توليد الكهرباء 137
6.2.1 أمثلة للمحطات الكهربية الكهروضوئية 137
6.2.2 ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة... 139
6.3 الأنواع المختلفة من محطات الشمسية الحرارية 142
6.3.1 منظومة القطع المكافئ.. 142
6.3.2 منظومة البرج المركزى.. 143
6.3.3 منظومة القطع الدائرى... 144
6.3.4 من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟ 147

6.3.5 استخلاص الحرارة 147
6.4 أنواع أخرى من محطات الـ GEOTHERMAL 148
6.4.1 محطات البخار الجاف: 148
6.4.2 محطات الدائرة المزدوجة: 148
6.5 أساسيات عملية المد والجزر TIDAL POWER STATIONS 150
6.5.1 فكرة التوليد 151
6.6 طاقة الرياح 154
6.6.1 الطاقة الشمسية هى مصدر الرياح 154
6.6.2 كيف تعمل توربينات الرياح ؟ 154
6.6.3 مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح 155
6.6.4 كمية الطاقة المولدة من الرياح 157
6.7 العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة 157
6.7.1 تشغيل تربينة الرياح: 158
6.7.2 زاوية الهجوم: 158
6.7.3 منحني القدرة : 159
6.7.4 مميزاتها وعيوبها: 160
6.7.5 ترتيب التربينات فى مزارع الرياح 160
6.8 طـاقة الرياح في مصـر 162
6.9 محطات الرياح في البحار والمحيطات 164
Appendix A 168
العوامل المؤثرة فى اقتصاديات المحطات 168
معدل الفائدة Rate of Interst 169
معدل الإهلاك Depreciation 170
تسعير الكهرباء المباعة Tariff 170
تعظيم عائد الاستثمار فى محطات الكهرباء 174
مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة فى أمريكا 175
7 180
7.1 الجهود المستخدمة فى شبكات النقل 180
7.1.1 اختيار جهد النقل 181
7.2 نبذة عن تطور نقل الطاقة 182
7.2.1 مشاكل النقل بنظام الـ AC 182
7.3 مقارنة بين النقل باستخدام الـ HV-AC باستخدام HV-DC 183
7.3.1 عيوب نظام الـ HV-DC 184
7.3.2 مميزات نظام الـ HV-DC 185

7.3.3 متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟ 187
7.3.4 مقارنة التكلفة فى النظامين 187
7.4 مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية 188
7.5 المواضيع الهامة فى دراسة خطوط النقل 190
8 194
8.1 تصميم الأبراج 194
8.1.1 عناصر مكونات الأبراج 196
8.2 المسافات فى الأبراج الكهربية 198
8.2.1 ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض 198
8.2.2 المسافة بين البرج والذى يليه 199
8.2.3 مسافة طريق مرور الأبراج Right of Way.. 199
8.2.4 تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج 201
8.3 أنواع الأبراج : 203
8.3.1 أبراج تعليق Suspension Towers :.. 203
8.3.2 أبراج شد Tension Towers : 204
8.3.3 أبراج التبديل Transposition Towers:.. 204
8.4 الموصلات فى أبراج الجهد العالي :................................ 205
8.4.1 خصائص المواد المستعملة في صناعة المواصلات 206
8.5 أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي 207
8.5.1 الموصلات المجدولة (Stranded Conductors) :.................................... 207
8.5.2 موصلات الألمونيوم الخالص 208
8.5.3 الألمونيوم المقوي بالصلب: 208
8.5.4 موصلات سبائك الألومنيوم.. 209
8.5.5 الألومنيوم المقوي بسبيكة الألومنيوم 209
8.5.6 سبيكة الألومنيوم المقوي بالصلب: 209
8.5.7 أطوال الموصلات 210
8.6 الاكسسوارات ACCESSORIES التى تستخدم فى الخطوط............. 210
8.6.1 فواصل الموصلات... 210
8.6.2 خامد الاهتزازات Dampers.. 211
8.6.3 كرات تحذير الطائرات 212
9 214
9.1 وظيفة العوازل: 215
9.2 التصنيف حسب الشكل التصميمى: 215

9.2.1 تصميم عوازل الطاقية والمسمار 215
9.2.2 تصميم عوازل الساق الطويلة 216
9.3 تصنيف العوازل حسب مادة الصنع: 217
9.3.1 عوازل بورســلين:Porcelain : 217
9.3.2 العوازل الزجاجــية:Glasses 218
9.3.3 العوازل المطاطـــية: rubber 218
9.4 الأعطال التي تتعرض لها العوازل: 219
9.4.1 تأثير التلوث على أداء العازل 219
9.4.2 كيفية حدوث الومضة الكهربيةFlashover 220
9.4.3 ما هى الــ Creepage Distance ؟ 220
9.4.4 تنظيف العوازل 223
9.5 أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل 224
9.5.1 تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل 224
9.6 ظاهرة الكورونا 225
9.6.1 أسباب ظاهرة الكورونا : 226
9.6.2 الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا : 227
9.7 توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل: 228
9.7.1 رفع كفاءة توزيع الجهد 229
9.7.2 علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل 231
9.7.3 أسلوب الــ Insulation Coordination 233
10 236
10.1 مقدمة 236
10.2 مقاومة الخط 236
10.2.1 ظاهرة الــتأثير السطحى Skin Effect 237
10.2.2 العوامل المؤثرة على الـــ Skin Effect 238
10.2.3 لماذا نلجأ لاستخدام حزم من الموصلات Bundle Conductors 238
10.3 القيمة الحثية للخط وتأثيراتها 238
10.3.1 ما هى الـــ Inductance , L ؟ 238
10.3.2 تأثير الــ Inductance على الحدود القصوى لنقل الطاقة 240
10.3.3 هل الخطوط القصيرة أفضل فى نقل الطاقة؟ 241
10.3.4 تأثير الـــ Inductance على حدود القدرات غير فعالة 242
10.4 سـعة الخطوط CAPACITANCE وتأثيراتها 243
10.4.1 مصطلح الــ Admittance, Y 245

10.5 طرق تمثيل الخط رياضيا 245

10.5.1 تمثيل الخطوط القصيرة : 245

10.5.2 تمثيل الخطوط متوسطة الطول 247

10.5.3 تمثيل الخطوط الطويلة : 249

10.6 الظواهر التى تترتب على وجود الـ CAPACITANCE فى الخطوط 252

10.6.1 ظاهرة Ferranti Effect 252

10.6.2 ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر فى الشبكات المعزولة 253

10.6.3 ظاهرة الـقوس الأرضى Arcing Ground 255

11 258

11.1 مفاهيم أساسية 258

11.1.1 تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربية 258

11.1.2 مفهوم معامل القدرة Power Factor 259

11.2 القدرة غير فعالة REACTIVE POWER 260

11.2.1 هل القدرة غير فعالة لافائدة لها؟ 263

11.2.2 إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power 264

11.3 ماهو مفهوم الـ SURGE IMPEDANCE LOADING, SIL ؟ 265

11.3.1 أهمية قيمة الـ SIL 266

11.3.2 دور القدرة غير الفعالة فى خطوط النقل 267

11.4 معوضات القدرة غير فعالة 269

11.4.1 الفرق بين مرور الـ P ومرور الـ Q فى الخطوط 270

11.4.2 الهدف من استخدام هذه التقنيات : 271

11.4.3 التحكم فى عناصر الشبكة 271

11.5 الأجهزة التقليدية للتحكم فى تدفق القدرة غير الفعالة 272

11.5.1 المولدات الكهربية : 272

11.5.2 المعوضات المتزامنة Over-Excited Synchronous Motor: 272

11.5.3 استخدام Shunt Reactors : 273

11.5.4 استخدام الـ Series Capacitors: 273

11.5.5 استخدام الـ Shunt Capacitors : 274

11.6 ثانيا : أجهزة الـ FACTS للتحكم فى تدفق القدرة 275

11.6.1 أجهزة المعوضات الثابتة Static VAR Compensators, SVC 276

11.6.2 أجهزة الـ STATCOM: 278

11.6.3 أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators : 279

11.6.4 منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controllers 280

12 283

12.1 مقدمة 283
12.1.1 أهمية محطات الــ Transmission S/S 284
12.1.2 أمثلة عملية 285
12.1.3 وظائف أخرى لمحطات التحويل 288
12.1.4 تصنيف محطات التحويل 289
12.2 الهيكل العام لمحطة التحويل 291
12.2.1 المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي 291
12.2.2 المنطقة الثانية: منطقة المحولات 292
12.2.3 المنطقة الثالثة: منطقة خلايا الجهد المتوسط 292
12.2.4 القسم الرابع: منظومة الــ DC 292
12.2.5 القسم الخامس: منظومة التحكم 293
12.2.6 القسم السادس : منظومة الاتصالات 293
12.2.7 القسم السابع : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق 293
12.2.8 القسم الثامن : منظومة التأريض 293
12.3 الأعمال الكهربية لإنشاء محطة تحويل 295
12.4 خريطة الباب 297
13 299
13.1 قراءة مخطط المحطة 299
الجزء الأول من الفصل الثالث عشر 304
مهمات منطقة الـجهد العالي فى محطات الـــ AIS 304
13.2 مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR 304
13.2.1 النوع الأول : (Valve Type Arrester) 305
13.2.2 النوع الثاني : Metal-Oxide (ZnO) Arrester 306
13.3 سكاكين الفصل ISOLATORS 308
13.4 مفاتيح التأريض: (EARTHING SWITCHES) 311
13.5 تسلسل عمليات الفصل و التشغيل فى المحطة 311
13.5.1 خطوات فصل خط هوائي (المغذى Feeder) يتبع الآتى: 311
13.5.2 خطوات توصيل خط هوائي يتبع الآتى: 312
13.5.3 تشغيل مجموعتان من القضبان الرئيسية 312
13.5.4 ما الفرق بين فصل الخط ، عزل الخط ، وانسحاب الجهد؟ 312
13.6 محولات التيار CURRENT TRANSFORMER 313
13.7 محولات الجهد 314

13.8 محولات التأريض (EARTHING TRANSFORMER)................ 317

13.9 القواطع CIRCUIT BREAKERS 319

13.9.1 أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربية:.. 320

13.9.2 الأجزاء الرئيسية بالقاطع... 321

13.9.3 آليات الحصول على القوة المحركة:... 321

13.10 أنواع القواطع بالمحطات 323

13.10.1 النوع الأول : Oil CB.. 323

13.10.2 النوع الثاني Air Blast CB :-... 325

13.10.3 النوع الثالث : القاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) : 326

13.10.4 النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الــ SF6 326

13.10.5 ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6: 328

13.10.6 ما هو دور جهاز الــ anti-pumping relay ؟....................................... 329

13.10.7 ملحوظات من الواقع: 330

13.10.8 توصيف الـــ Circuit Breakers: 331

13.11 الاختبارات التي تتم على قواطع الجهد العالي والمتوسط 332

13.11.1 الفحوصات العامة للقواطع 332

13.11.2 اختبارات قوة العزل بالقاطع 333

13.11.3 فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة..................................... 334

13.11.4 اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل: 335

13.11.5 اختبارات تسلسل التشغيل... 335

الجزء الثانى من الفصل الثالث عشر 337

منطقة الـجهد العالي فى محطات الـــ GIS.. 337

13.12 المهمات فى محطات الـ GIS................................. 337

13.12.1 مكونات الــ Bay 338

13.12.2 الدخول إلى محطة GIS.. 342

13.12.3 الحماية من الصواعق فى محطات الــ GIS 343

مقارنة المحطات الهوائية والغازية.. 346

13.13 المحطات الهوائية (AIS): 346

13.14 محطات الـ GIS 347

13.15 المقارنة بين المحطات الهوائية والمحطات الغازية...................... 347

13.15.1 ميزات المحطات الهوائية: 347

13.15.2 عيوب المحطة الهوائية : 348

13.15.3 ميزات محطات الــ GIS:... 348

13.15.4 عيوب محطات الــ (GIS):.. 349

13.15.5 مقارنة بين اقتصاديات المحطات 350

14 352

14.1 تصنيع القضبان العمومية 352

14.1.1 مميزات وعيوب الـــ (Rigid Bus) : 355

14.2 ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS............................... 355

14.3 النظام الأول: SINGLE BUS BAR: .... .357

14.3.1 محطات تحويل أحادية القضبان 357

14.3.2 محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان 357

14.4 النظام الثاني: نظام القضبان المزدوجة DOUBLE BUS BAR: 359

14.4.1 النوع الأول من القضبان المزدوجة : Double BB with Single CB.......... 359

14.4.2 النوع الثاني Double BB with Double CB...................................... 361

14.4.3 النوع الثالث: Double BB with One and Half CB 362

14.4.4 النوع الرابع Main and Transfer.. 364

14.5 النظام الثالث : الـ RING SYSTEM أو MESH-SYSTEM......... 366

14.6 مقارنات بين الأنواع المختلفة 367

15 369

15.1 فكرة الأرضى 369

15.1.1 أشكال التأريض 370

15.2 التأريض فى محطات الجهد العالي................................ 371

15.2.1 جهد اللمس 372

15.2.2 لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضى منخفضة جدا؟ 373

15.2.3 جهد الخطوة 373

15.2.4 كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟ 374

15.3 شبكات التأريض فى المحطات الكهربية .... .375

15.3.1 ما هى الـــ Ground mat ؟ 377

15.3.2 أشكال الـــ Earthing Grid.. 378

15.4 خطوات التصميم 379

15.4.1 خطوات ماقبل التصميم 379

15.4.2 الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة.. 380

15.4.3 الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor..................... 381

15.4.4 الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود 383

15.4.5 الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس 387

15.4.6 الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها 388

15.4.7 الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى 389
15.4.8 الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض........................ 390
15.4.9 الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR........................ 392
15.4.10 الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين............. 392
15.4.11 الخطوة العاشرة : المقارنات 393

16 401

تغذية مساعدات المحطة 402

16.1 التغذية بنظام الـ AC SYSTEM: 402

16.2 التغذية بنظام الـ DC SYSTEM: 403

16.2.1 الشواحن : (Battery Chargers).. 404
16.2.2 طرق شحن البطاريات : 404
16.2.3 هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟... 405
16.2.4 عيوب وميزات البطارية الحامضية 405
16.2.5 عيوب وميزات البطارية القلوية... 406
16.2.6 الشروط الواجب توافرها في غرفة البطاريات بمحطات الكهرباء : 406
16.2.7 صيانة البطاريات : 407
16.2.8 أعطال البطارية وكيفية إصلاحها : 407

قسم الوقاية والتحكم.. 408

نظم التحكم الحديثة 410

16.2.9 وظـــــائـف نظــــــــام الـ SAS 411
16.2.10 مقارنة بين التحكم فى المحطات التقليدية والمحطات الحديثة....................... 413
16.2.11 هيكل التحكم فى نظام الـ SAS... 415

منظومات الـوقاية الكهربية فى محطات التحويل 417

16.2.12 نموذج لمنظومة حماية أحد المغذيات... 418
16.2.13 نموذج لمنظومة حماية المحول.. 419

وسائل الاتصالات بمحطات التحويل.. 420

16.2.14 الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC 420
16.2.15 دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap.................................. 421
16.2.16 الاتصالات عن طريق : Pilot Cable 422
16.2.17 الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO 422
16.2.18 الاتصالات اللاسلكية: Wireless 422

نظم الوقاية من الحريق فى المحطات.. 424

16.3 مصادر الخطورة فى المحطات 424

16.3.1 نظرية الإطفاء.. 424

16.4 مكونات نظام الإطفاء الثابت: 425

16.4.1 آلية الإطفاء 426

16.5 أنواع أنظمة إطفاء الحريق 427

16.5.1 الماء تحت ضغط الهواء 427

16.5.2 نظام ثاني أكسيد الكربون 428

16.5.3 نظام الماء تحت ضغط ثاني إكسيد الكربون 428

16.5.4 نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول: 429

17 432

17.1 مقدمة .... 432.

17.1.1 تحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات: 433

17.1.2 الدراسات الخاصة بالأحمال Load Stduies: 434

17.1.3 توصيف عناصر شبكات التوزيع : 435

17.1.4 البدائل المتاحة فى عملية تصميم شبكات الجهد المتوسط 436

17.1.5 الدراسات والحسابات والبرامج المطلوبة لعملية التخطيط 436

17.2 استخدام الـ OPTIMIZATION TECHNIQUES 437

17.2.1 كيفية الوصول للحل الأمثل 437

17.3 خريطة هذا الباب 439

18 441

18.1 مراحل تصميم شبكة توزيع 441

18.1.1 المرحلة الأولى: تقدير الأحمال 441

18.1.2 المرحلة الثانية : إختيار جهد محطة التوزيع 443

18.1.3 المرحلة الثالثة : اختيارات المحطة / المحطات الرئيسية 445

18.1.4 المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع الابتدائية 446

18.1.5 المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية Radial/Ring ؟ 447

18.1.6 كيف يتم حساب مقطع الكابل فى التغذية الحلقية؟ 449

18.1.7 المرحلة السادسة : حسم نوعية محطة التحويل الابتدائية هوائية/غازية؟ 449

18.1.8 المرحلة السابعة : اختيار نوعية قضبان التوزيع 450

19 453

19.1 ضخامة منظومة التوزيع 454

19.2 العنصر الأول فى منظومة الجهد المتوسط: الموزع 456

19.2.1 المهمات داخل مبنى الموزع Distributor 456

19.2.2 لوحة التوزيع (الموزع) 456

19.2.3 التحكم فى الموزعات 458

19.2.4 مكونات الخلية 459

19.2.5 المهمات الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle 460
19.2.6 المهمات الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing 461
19.2.7 المهمات الموجودة بخلية الربط : 461
19.2.8 مخطط لوحة الموزع 462
19.3 المهمات الأخرى الموجودة بمبنى الموزع: 463
19.3.1 البطاريات: 463
19.3.2 الشاحن (التونجر) 463
19.3.3 ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟ 464
19.4 العنصر الثانى فى منظومة الجهد المتوسط: محولات التوزيع............ 465
19.4.1 استخدام الفيوزات فى شبكات التوزيع 468
19.4.2 ميزات وعيوب الفيوز Fuse 468
19.4.3 أرقام هامة لتوصيف الفيوز 469
19.4.4 أنواع الفيوزات 471
19.4.5 قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب 472
19.4.6 تنسيق الفيوزات فى شبكات التوزيع 473
19.4.7 ضبط قيم أجهزة حماية محولات التوزيع: 480
19.4.8 حماية محولات التوزيع من الجهود العالية 486
19.5 العنصر الثالث فى منظومة الجهد المتوسط: وحدة الربط الحلقية 487
19.5.1 صناديق التوزيع فى شبكة الجهد المنخفض : 487
19.5.2 تنسيق صناديق التوزيع 489
20 491
20.1 أشكال منظومة التغذية 491
20.1.1 نظام الشبكات الإشعاعية 491
20.1.2 نظام الـــ Loop المفتوحة 492
20.1.3 نظام الـــ Loop المغلقة 494
20.1.4 تغذية كبار المشتركين 494
20.1.5 أنظمة من الواقع 495
20.2 تأثير دخول التوليد الموزع DG ضمن منظومة التوزيع 499
20.2.1 ميزات وعيوب التوليد الموزع 500
20.2.2 مشكلة الــتنسيق - Coordination 501
20.2.3 مشكلة الخط فى تقدير مسافة العطل 502
20.2.4 مشكلة ارتفاع مستوى القصر 503
20.2.5 مشكلة الانعزال Islanding 503
21 506
21.1 أشكال التغذية فى شبكات التوزيع الهوائية 506

21.1.1 أولا الشبكات الإشعاعية Radial 506
21.1.2 ثانيا التوصيل الحلقى Ring 508
21.2 العناصر الأساسية فى شبكات التوزيع الهوائية 509
21.3 أبراج شبكة الجهد المتوسط........................ 509
21.4 العوازل المستخدمة فى شبكات الجهد المتوسط........................ 512
21.5 الاكسسورات المستخدمة فى الشبكات الهوائية........................ 513
21.5.1 كلامبات الشد Tension clamp 513
21.5.2 السكاكين........................ 514
21.5.3 النوع الأول : السكاكين الهوائية........................ 514
21.5.4 النوع الثانى : Load Break Switch 515
21.6 الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط 515
21.7 أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائى RECLOSER 518
21.8 مانعة الصواعق........................ 520
21.9 أجهزة مبينات الأعطال 521
21.10 الأرضى فى شبكات التوزيع........................ 523
21.10.1 الأرضي المؤقت Temporary Earthing 524
21.11 المشاكل التي تتعرض لها الخطوط الهوائية بشبكة التوزيع........................ 524
22 526
22.1 الاعتمادية فى الشبكات 526
22.1.1 الفرق بين الــReliability& Power Quality" 526
22.2 تنظيم الجهد فى شبكات التوزيعVOLTAGE REGULATION 529
22.2.1 فكرة عمل منظم الجهد 529
22.2.2 مثال تطبيقى لتقدير حجم الــ AVR 531
22.3 التحكم فى شبكات التوزيع........................ 535
22.3.1 تعريف الـــ Distribution Automation: 535
22.3.2 أجهزة الــ IED 535
22.3.3 أجهزة الــ SCADA 536
22.3.4 الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع 539
22.3.5 إشارات منقولة من محطات المحولات........................ 539
22.3.6 إشارات منقولة من محولات التوزيع 540
22.3.7 أدوار التحكم فى شبكات الجهد المتوسط: 540
22.3.8 ثانيا التحكم فى شبكة الجهد المنخفض: 542

22.4 منظومة الاتصالات فى شبكات التوزيع : COMMUNICATIONS 543
22.4.1 شبكة الاتصالات فى الجهد المتوسط 543
22.5 ملحق بأشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات 544
23 553
23.1 المواد المعدنية المستخدمة فى صناعة الموصلات 553
23.1.1 ثانيا المواد المعدنية المستخدمة للحماية 554
23.2 المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات 555
23.2.1 ما معنى عازل كهربائي؟.. 555
23.2.2 أهم خصائص المـادة العـازلــة كهربيا 555
23.3 مقدمة عن البوليمرات 556
23.3.1 تطبيقات البولميرات الصناعية Synthetic Polymer................................ 557
23.3.2 اللدائن الحرارية : البولى فينيل كلورايد PVC 557
23.3.3 الجوامد الحرارية :-Thermo-sets... 558
23.3.4 المطاط:-RUBBER 558
23.3.5 البولي ايثلين التشابكيXLPE :- 559
23.4 أبرز مشاكل العوازل 559
23.4.1 المفقودات Losses 559
23.4.2 التيارات المتسربة خلال العوازل 560
23.4.3 ظاهرة WATER TREE : 560
24 563
24.1 تركيب كابلات الجهد العالي :................................ 563
24.1.1 الموصل Conductor 564
24.1.2 حجاب الموصل (طبقة شبه الموصل)Semiconductor Layer 566
24.1.3 العــــزل INSULATION... 567
24.1.4 حجاب العازل (شبه الموصل الثانى).. 567
24.1.5 الغلاف المعدنى Metallic sheath.. 568
24.1.6 مزايا الأغلفة المعدنية عامة 569
24.1.7 الحشــو أو (الفرشة) FILLING - BEDDING:................................ 569
24.1.8 التسلـــيح (التدريع) ARMOUR : 569
24.1.9 المشاكل المرتبطة بالغلاف Sheath Effect 570
24.1.10 الغلاف الخارجى OUTER SHEATH: 573
24.1.11 أطراف التوصيل الخارجية 574
25 577
25.1 مقاومة الموصل CONDUCTOR RESISTANCE................... 577

25.1.1 مقاومة العزل Insulation resistance 578
25.2 محاثة الكابلات INDUCTANCE OF CABLE 578
25.3 سعة الكابل CABLE CAPACITANCE 580
25.4 المجال المغناطيسى للكابلات : 581
25.5 المجال الكهربى للكابلات 582
25.5.1 قياس شدة المجال الكهربي Electrical field 583
25.5.2 تأثير المجال الكهربى على الأطراف : 583
25.5.3 تأثير المجال الكهربي على ظاهرة WATER TREE : 584
26 586
26.1.1 الاختبارات الروتينية: 586
26.1.2 الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة): 587
26.1.3 الاختبارات النوعية: 588
26.2 اختبارات الموقع للكابلات الجديدة والاختبارات أثناء الخدمة 588
26.3 اختبار تحديد الأوجه PHASE CHECKING 589
26.4 اختبار الاستمرارية 589
26.5 اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر 590
26.5.1 توصيلات الجهاز 591
26.6 اختبار قياس سعة الكابل (CABLE CAPACITANCE) 592
26.7 مجموعة اختبارات العازل 592
26.7.1 اختبار العازل باستخدام الـ Hipot 595
26.7.2 اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance Test 595
26.7.3 اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown Test 595
26.7.4 اختبار مدة تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test 596
26.7.5 اختبار كفاءة العزل (الـــ Tan delta(δ)) 596
26.7.6 مقارنة قيم الاختبارات: 597
26.8 اختبار الغلاف الخارجي DC SHEATH TEST 598
26.9 اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل 599
26.10 اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني 599
26.11 اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق 600
26.12 اختبار (PD) PARTIAL DISCHARGE TESTING: 601
26.13 اختبارات تحمل الجهد العالي 602

26.13.1 اختبار الجهد العالي لدوائر 132 ك.ف ، أو أعلى 602
26.13.2 تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة : 604
26.13.3 تأثير استخدام الــ HVAC.. 605
26.13.4 استخدام تردد منخفض VLF(Very Low Frequency)......................... 606

27 608

27.1 الأسباب الأساسية لانهيار الكابلات: 608

27.1.1 أسباب تتعلق بالكابل نفسه 608
27.1.2 أسباب تتعلق بالعزل خصوصا 609
27.1.3 أسباب ميكانيكية... 609
27.1.4 أسباب كيميائية 609
27.1.5 أسباب تتعلق بسوء طريقة المـــد 610
27.1.6 أسباب تتعلق بسوء اللحام.. 610

27.2 مراحل اكتشاف الأعطال 611

27.3 أجهزة تستخدم للقياس المبدئى لمسافة العطل.......................... 612

27.3.1 جهاز صدى النبضة (الردار) (Pulse Echo) 613
27.3.2 كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo 613
27.3.3 تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الــ Pulse Echo..................................... 615
27.3.4 كيفية حساب المسافة.. 618
27.3.5 مشاكل استخدام الـــ TDR:... 619
27.3.6 استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل................................. 619
27.3.7 طريقة قنطرة مورى Murray Bridge لقياس مسافة العطل............................ 621

27.4 التحديد الدقيق لمكان العطل.................................. 622

27.4.1 استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator فى تحديد المكان............. 622
27.4.2 سماعات الاستشعار 624
27.4.3 استخدام طريقة الــ Arc reflector فى تحديد مكان العطل 625
27.4.4 تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي.. 625

27.5 سيارات فحص الكابلات 626

27.6 خلاصة بعض الخبرات الفنية.................................. 629

28 635

28.1 مقدمة الفصل: 635

28.1.1 مالمقصود بالــ Transient Analysis والــ SS- Analysis؟.................... 636
28.1.2 مدى الهزات العابرة.. 636
28.1.3 لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الــ Transient ؟...................................... 637
28.1.4 كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الــ Transients؟ 638

28.1.5 تحرير المصطلحات 640
28.1.6 مصدر تغذية الهزات العابرة 641
28.1.7 الأنواع المختلفة من الهزات العابرة 641
القسم الأول من أنواع الهزات العابرة: 644
الهزات العابرة المسببة لتغير فى شكل الموجة 644
28.2 الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها مكثف ومقاومة 644
28.2.1 مفهوم الـــ Time Constant, TC 645
28.3 الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة 646
28.4 الهزات عند تطبيق AC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة 647
القسم الثانى من أنواع الهزات العابرة 650
الهزات العابرة المسببة لارتفاع فى الجهد 650
28.5 ظاهرة ارتفاع الجهد 650
28.5.1 طبيعة الـ Voltage surges 651
28.5.2 ماذا نقصد بـــ (BIL) Basic Impulse level 652
28.6 أولا : الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية LIGHTNING....... 654
28.6.1 ما هو البرق؟ 654
28.6.2 تأثر جهود الأجسام بالبرق 655
28.6.3 طرق الحد من تأثير الصواعق فى شبكات الجهد العالى: 657
28.7 الهزات الناتجة عن فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة) 659
28.7.1 طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الــ CB 662
28.8 الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات CAPACITOR SWITCHING 664
28.8.1 ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟ 664
28.8.2 ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟ 666
28.9 الاهتزات الناتجة عن فصل وتشغيل بعض الأحمال 667
28.10 الهزات العابرة الناتجة عن ظاهرة FERRO RESONANCE 669
28.11 وسائل الحماية من الـ VOLTAGE SURGES فى شبكات الجهد المنخفض 670
القسم الثالث من أنواع الهزات العابرة 672
الهزات العابرة المسببة لانخفاض فى الجهد 672
28.12 ظاهرة هبوط الجهد 672
28.12.1 الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage 672

28.12.2 الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag 673
28.12.3 انخفاض الجهد المؤقت بسبب حالات القصر Short Circuit 674
674 ....
28.12.4 انخفاض الجهد المؤقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة 675
28.12.5 ظاهرة ارتعاش الجهد (Voltage Fluctuation (flicker 676
28.12.6 تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة... 677
28.12.7 وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد 678
28.12.8 استخدام أجهزة الـــ Power Conditioners 678
29 682
29.1 ماذا نقصد بالـ STABILITY 682
29.2 دلالات استقرار الشبكة 684
29.3 أهم المصطلحات والتعريفات 684
29.3.1 Rotor Angle Stability.. 685
29.3.2 Frequency Stability.. 686
29.3.3 Voltage Stability 686
29.3.4 صعوبة دراسة موضوع الـ Stability 687
النوع الأول من دراسات استقرار الشبكة: 688
29.4 ROTOR ANGLE STABILITY 688
29.4.1 تعريف زاوية الـ Rotor Angle.. 688
29.4.2 التحكم فى الـ Rotor Angle 689
29.4.3 تأثيرات ناتجة عن تغير الـ Rotor Angle... 689
29.4.4 صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ Rotor Angle................................. 690
29.5 دراسة الـ EQUAL AREA CRITERIA 691
29.5.1 مفهوم الـــ Equal Area Criteria... 691
29.5.2 تأثير وجود خطين متوازيين بين المصدر والحمل على الـــ Stability 693
29.5.3 تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة 695
النوع الثانى من دراسات الاستقرار: 696
29.6 FREQUENCY STABILITY 696
29.7 تأثير الـ INERTIA على حجم التغير فى التردد 696
29.7.1 المجالات التى يتغير فيه التردد... 697
29.8 كيف يمكن علاج مشاكل الـ POWER DEFICIT؟ 698
29.8.1 مراحل التحكم فى التردد: 699
النوع الثالث من دراسات الاستقرار: 700

29.9 VOLTAGE STABILITY 700

29.10 أنواع الـ VOLTAGE STABILITY 701

29.10.1 ظاهرة انهيار الجهد الـــ Voltage Collapse 701

29.11 أساسيات دراسة استقرار الجهد 701

29.12 تأثر الجهد بتغير القدرة غير الفعالة 703

29.13 العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد (عدم اتزانه).................. 706

29.13.1 ملحوظات على استقرار الجهد 707

29.14 طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات 708

29.14.1 أولا فى شبكات الجهد العالى :... 708

29.14.2 ثانيا : فى الجهد المتوسط والمنخفض.. 709

30 714

HARMONICS 714

30.1 ماهى الـ HARMONICS وكيف تنشأ ؟................................ 715

30.1.1 طبيعة التوافقيات 716

30.1.2 لماذا تختلف الـ Harmonics فى إشارتى الجهد والتيار لنفس الحمل؟............ 717

30.2 مصادر توليد الـ HARMONICS : 718

30.2.1 أجهزة التى تستخدم معدات الـ Power Electronics : 719

30.2.2 مصابيح الفلورسنت: 720

30.2.3 المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" 726

30.3 سمات هامة للتوافقيات. 728

30.4 كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات؟................................ 730

30.5 المشاكل الناتجة عن التوافقيات. 731

30.5.1 تأثير التوافقيات على المحولات: 731

30.5.2 ما هو الـــ K-Factor.. 732

30.5.3 كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟ 733

30.5.4 تأثيرات متنوعة للتوافقيات 734

30.6 ظاهرة الرنين................................ 738

30.6.1 خطورة ظاهرة الرنين 739

30.6.2 رنين التوازى.. 739

30.6.3 رنين التوالى 740

30.7 الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربية: 741

30.7.1 المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992 741

30.8 الحلول المستخدمة لـمنع ظهور الـتوافقيات 744

30.8.1 أولا :- الـــــ"Passive Harmonic Filters" 744

30.8.2 ثانيا:- الــــ "Active Harmonic Filters" 746

30.8.3 ثالثا : الــــ"Compound Harmonic Filters" 746

30.8.4 فكرة الـــ Harmonic Cancellation 746

30.8.5 مثال عملى للــ Harmonic Cancellation.. 747

30.9 مثال عملي آخر للحد من التوافقيات................................ 752

30.9.1 وصف المشكلة.. 752

30.9.2 آليات الحل 753

الباب الأول

توليد الطاقة الكهربية

مقدمة عامة

عملية توليد أو إنتاج الطاقة الكهربية هى في الحقيقة عملية تحويل للطاقة Energy Conversion من شكل إلى آخر ، فلا يمكن بحال من الأحوال توليد طاقة كهربية من لاشئ ، أو من العدم ، فالطاقة لا تفنى ولا تخلق من عدم كما نص على ذلك مبدأ بقاء الطاقة. وهذه مقدمة ضرورية فى بداية هذا الباب ، لاسيما بعد انتشار ظاهرة الاختراعات الوهمية والاكتشافات الخادعة فى الصحف ، ومعظمها يدور حول طرق وهمية لتوليد الطاقة الكهربية. فمن الأهمية بمكان أن نؤكد هنا أنه لا يمكن الحصول على طاقة كهربية إلا من طاقة أخرى من الطاقات الموجودة بالكون .

أهم مصادر الطاقة

مصادر الطاقة المتوافرة نوعان :

1- الوقود الأحفوري Fossil Fuel : هو عبارة عن بقايا الكائنات الحية من نباتات و حيوانات دُفنت عميقا في باطن الأرض منذ سنين طويلة ، و تعرضت إلى درجات حرارة و ضغط مرتفعين جداً ، مما أدى إلى تركيز مادة الكربون فيها و تحويلها إلى وقود أحفوري . و من أهم الأمثلة على الوقود الأحفوري : الفحم الحجري ، والنفط ، والغاز الطبيعي .

وقد سمي الوقود الأحفوري بهذا الاسم إما لأنه يستخرج من الأحفوريات (والأحفوريات عبارة عن كائنات ماتت منذ ملايين السنين ودُفنت بقاياها في باطن الأرض) ، أو لأنه يحتاج إلى أدوات حفر ليتم استخراجه من باطن الأرض.

و يشكل الوقود الأحفوري ما نسبته 90% من مجمل الطاقة المستخدمة في حياتنا اليومية. و من أكثر ميزات الوقود الأحفوري التي جعلت منه مصدرا مهما لإنتاج الطاقة ، أنه يمتلك كثافة طاقة عالية ، وأنه سهل النقل و التخزين ، و عندما تتم معالجته بتروكيميائيا فإننا نحصل منه على أنواع مختلفة من الوقود التي لها استخدامات متعددة .

و بالرغم من كل هذه الفوائد والحسنات للوقود الأحفوري إلا أنه من أكثر الأسباب التي تؤدي إلى دمار البيئة ، فهو من أهم الأسباب التي أدت إلى ظهور ظاهرة (الاحتباس الحراري) ، و تلوث الهواء بفعل الغازات الضارة و المواد المتطايرة الناتجة عن حرقه .

2- الطاقات المتجددة Renwable Energy : مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المستخرجة من باطن الأرض Geothermal والطاقة الحيوية Biomass ، وغيرها .

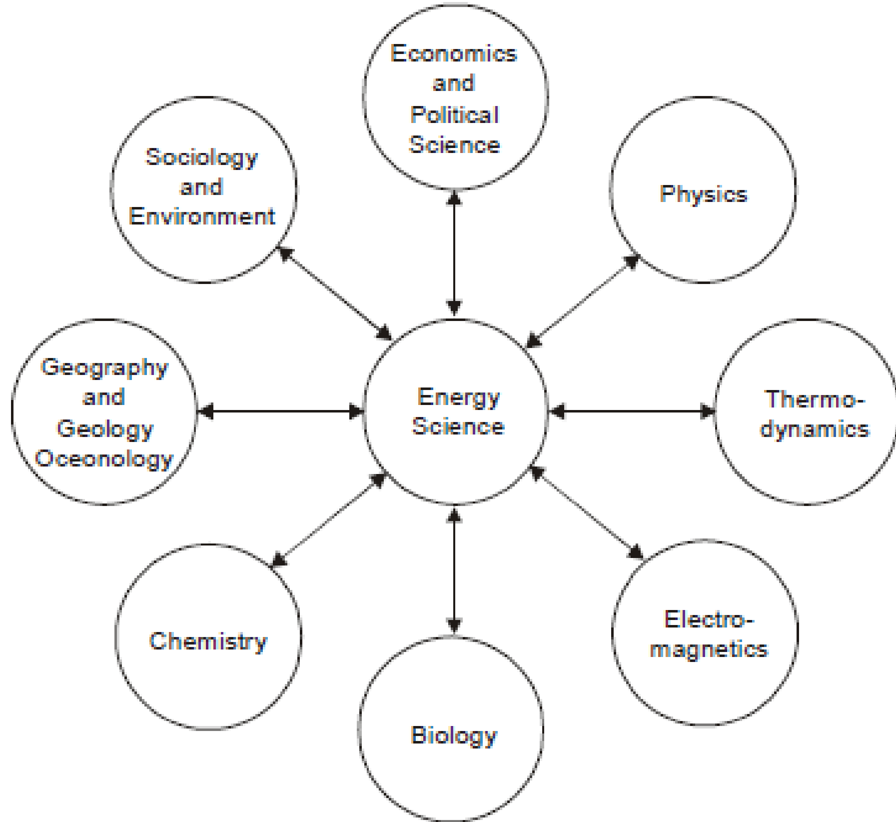
ويمكن أن نقول أن أصل هذه المصادر جميعها (سواء التقليدية أو المتجددة) هو الشمس التى تعتبر تقريبا مصدر لكل الطاقات على سطح الأرض ، فالرياح لا تتحرك سوى من ضغط مرتفع لضغط

منخفض ، والذى يتحكم فى هذه الضغوط هو الشمس ، وقس على ذلك باقى الطاقات مثل المد والجزر ، وطاقة الأمواج وطاقة باطن الأرض إلخ . كما أن الوقود الأحفورى كما ذكرنا يعود أصله إلى النبات ، وأصل الطاقة التى وضعت فى النبات هى الشمس ، ومن ثم ستجد دائما هناك علاقة مباشرة أو غير مباشرة بين مصدر الطاقة والشمس.

3- الطاقة النووية: ربما يشذ عن القاعدة السابقة أنواع محددة مثل الطاقة النووية ، فهذه لا علاقة لها بالشمس.

علم الطاقة

هذا العلم هو أم كل العلوم ، فالباحث فى علم الطاقة (وخاصة توليد الطاقة الكهربية) سيحتاج إلى دراسة علوم منوعة كما فى الشكل التالى الذى يثبت أن هذا العلم تصب فيه خلاصة كل العلوم. وهذا منطقى ، فالإنسان منذ بدء الخليقة يبحث عن الطاقة ، منذ زمن الإنسان الأول الذى اكتشف النار ، إلى إنسان العصر الحديث الذى اكتشف مصادر متعددة للطاقة كما ظهر فى البند السابق.



فهل بقى شئ!!

وحدات قياس الطاقة

بما أن توليد الطاقة الكهربية هى عملية من عمليات تحويل الطاقة فيجب أن نشير هنا إلى وحدات قياس الطاقة. الطاقة عموما (سواء ميكانيكية أو كهربية أو حرارية) تقاس بوحدة الجول Joule .

ففي حالة الطاقة الميكانيكية

يمثل الجول كمية الشغل Work الذى تبذله قوة قدرها واحد نيوتن حين تدفع جسما لمسافة قدرها متر واحد:

Work = Mechanical Energy (J) = Force (N) x Distance (mt) =Joules

وفى حالة الطاقة الكهربية

فإن نفس الوحدة (الجول) تمثل الطاقة الكهربية المستهلكة فى الثانية داخل أى جهاز كهربى له قدرة Power تساوى واحد وات:

Electrical Energy = Power (watt) × time (sec) = Volt × Amp × Sec = Joules

وحيث أن هذه الوحدة تمثل كمية ضئيلة من الطاقة فإننا يمكن أن نستخدام وحدات أكبر مثل kWatt-Hour

$$1\ (kWH) = 1000 \times 60 \times 60 = 36\times10^{5}\ Joule$$

أما فى حالة الطاقة الحرارية

فإن الطاقة تقاس بوحدة تسمى كالورى Calorie (وفى النظام الإنجليزى تقاس بوحدة BTU) ، وتمثل الطاقة المستهلكة Q لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة . ويمكن تحويل وحدة قياس الطاقة الحرارية Q لتقاس أيضا بوحدة الجول

$$Amount\ of\ Heat = Q = m(kg) \times c(Specific\ Heat\ const) \times \Delta T(°C)$$

$$1\ Calorie = 4.18\ Joule$$

علما بأن درجات الحرارة يمكن أن يعبر عنها بثلاث طرق مختلفة :

- الأولى درجة الحرارة المئوية .
- الطريقة الثانية فهى درجة الحرارة المطلقة أو مقياس كلفن K_o ، (Absulute Temprature) ، ونحصل عليها بإضافة 273 إلى الدرجة المئوية
- والطريقة الثالثة هى قياس الحرارة بالفهرنهايت (الأكثر استخداما فى أمريكا) ، والمعادلة التالية تعبر عن طريقة التحويل من درجة مئوية إلى فهرنهايت.

$$F = 32 + 1.8 \text{ times } °C$$

تصنيف محطات التوليد الكهربية

يمكن تصنيف محطات التوليد إلى نوعين : محطات تقليدية ، ومحطات الطاقة المتجددة.

ومن أشهر أنواع محطات التوليد التقليدية :

- محطات التوليد البخارية — Thermal Power Stations
- المحطات الغازية والدورة المركبة — Gas Turbine & Combined cycle
- محطات توليد الديزل — Diesel Power Stations
- محطات التوليد النووية — Nuclear Power Stations
- محطات التوليد المائية — Hydroelectric Power stations

ومن أشهر أنواع محطات الطاقة الجديدة والمتجددة :

- محطات الرياح — Wind Power stations
- محطات الطاقة الشمسية — Solar Power stations
- محطات المد والجزر — Tidal Power stations
- محطات طاقة باطن الأرض — Geothermal Power Stations
- محطات الطاقة الحيوية — Biomass Power Stations
- محطات موجات البحر — Wave Power stations
- تحويل طاقة المحيط الحرارية — Ocian Thermal Energy Conversion
- محطات خلايا الوقود — Fuel Cells Power Plants

فصول هذا الباب

فصول هذا الباب تسير على النحو التالي:

- الفصل الأول : يعرض مفهوم الشبكة القومية الموحدة ، وتفاصيل ربط وحدات التوليد معا.
- الفصل الثانى : المحطات الحرارية بأنواعها المختلفة (البخارية – الغازية – المركبة)
- الفصل الثالث : شرح تفصيلى للقسم الكهربى بمحطات التوليد عموما
- الفصل الرابع : المحطات النووية
- الفصل الخامس : المحطات المائية
- الفصل السادس : بعض المحطات المعتمدة على الطاقة الغير تقليدية (الشمسية – طاقة باطن الأرض – المد والجزر ، ومحطات طاقة الرياح) .
- ملحق الباب الأول : دراسة عن اقتصاديات محطات التوليد ، وأسعار إنشائها.

1

الشبكات الكهربية الموحدة

1.1 تاريخ الشبكات الموحدة

أنشأ توماس أيدسون أول محطة لتوليد الكهرباء فى العالم فى نيويورك بأمريكا فى 1882 ، وكانت مصر أول دولة عربية دخلتها الكهرباء على شكل مولدات ديزل فى 1863 فى عهد الخديوى اسماعيل ، لكن أول محطة كهرباء عمومية كانت فى 1895 زمن الاحتلال الانجليزى .

وأول شبكة موحدة تضم مستويات مختلفة من الجهود ووحدات توليد متعددة ومتنوعة كانت أيضا فى مصر ، فقبل إنشاء وزارة الطاقة الكهربية في مصر عام 1964 كان هناك العديد من الشركات والهيئات المسؤولة عن توليد الكهرباء في مصر والمسئولة أيضا عن الشبكات المستخدمة في النقل والتوزيع. وكانت بعض أنواع التيارات المستخدمة في مجال التوزيع من النوع الـ DC ، والبعض الآخر كان AC بنوعيه (1-phase) و (3-phase) . بل كان البعض منهم يعمل على تردد (40Hz) والبعض الآخر على تردد (50Hz) . وكان جهد التوزيع في بعض المناطق مثل الاسكندرية (110 V) ، وفى مناطق أخرى كان الجهد 220V. وبالتالي كان لابد قبل إنشاء شبكة الكهرباء الموحدة التي بإمكانها ربط جميع الشبكات مع بعضها البعض أن يتم أولا توحيد وتنسيق الترددات والجهود التي تأتي من محطات توليد الكهرباء المختلفة ، وكذلك توحيد وتنسيق الجهود المستخدمة في النقل والتوزيع.

أما الدول العربية ، فالعراق عرف الكهرباء فى 1917 زمن الاحتلال الإنجليزى أيضا ، وكانت بغداد مضاءة بالكامل فى 1928 ، أما السعودية فقد بدأت باستخدام مولدات الديزل فى أوائل العشرينات .

واستخدمت الكهرباء ضمن شبكة كهربية عمومية فى الكويت في عام 1934م ، وكانت قائمة على مولدات مختلفة الأحجام ، و في عام 1951م تم إنشاء أول محطة توليد بمنطقة الشويخ ، وكان جهد الشبكة الكهربائية حينها لا يتجاوز (11000) فولت ، ومع التطور الزمنى أصبح الآن بالكويت شبكة قوية بقدرة تتجاوز 13 جيجاوات وبجهد يصل إلى 400 ك ف.

1.1.1 الشبكات الكهربية الموحدة

فى كل دول العالم يتم ربط محطات التوليد داخل كل دولة معا بشبكة نقل جهد عالى ، بحيث تصبح جميع المولدات تصب فى شبكة واحدة ، وجميع الأحمال تأخذ من نفس هذه الشبكة . والهدف واضح من هذا الأسلوب ، فلو كانت كل محطة مسئولة عن مدينة معينة ، فإن خروج هذه المحطة من الخدمة لأى سبب يعنى فقد الطاقة الكهربية بالكامل فى هذه المدينة ، بينما فى حال ربط المحطات معا ، فإن خروج وحدة توليد يمكن فى معظم الأحيان تعويضها بسهولة من الاحتياطى الموجود فى بقية المحطات المتصلة بالشبكة.

وأنت عندما تقول مثلا أن الكهرباء فى بيتى تأتى من محطة شبرا الخيمة لأنك تسكن بجوار هذه المحطة فهذا خطأ ، والصحيح أن الكهرباء تأتيك من الشبكة الموحدة .

وأكبر شبكة كهربية موحدة فى الشرق الأوسط هى الشبكة السعودية ، حيث بلغت قدرات التوليد المتاحة من الكهرباء لدى الشركة السعودية 65506 ميجاوات بنهاية 2014 ، وبذلك تعد الشركة السعودية للكهرباء أكبر منتج للطاقة الكهربائية في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (تمتلك السعودية أكثر من 50 محطة توليد بأنواع وقود متنوعة ، ويشكل إنتاج المملكة أكثر من 25% من إنتاج 18 دولة عربية مجتمعة) .

بينما تأتى مصر فى المرتبة الثانية حيث يبلغ إجمالى القدرة المركبة بها حوالي 36000 ميجاوات ، وتقوم بإنتاج ونقل وتوزيع الطاقة على مستويات الجهود المختلفة (500 ، 400 ، 220 ، 132 ، 66 ، 33 ك فولت) من خلال محطات التوليد المختلفة بالشبكة (بخارية ، غازية ، مركبة ، مائية ، رياح ، شمسية). وتأتى بعد ذلك الإمارات والعراق والكويت والجزائر على الترتيب ثم بقية الدول العربية.

1.1.2 الربط الكهربى بين الدول العربية

تتمثل الفائدة الأساسية لربط عدة شبكات كهربائية معا في تقليل القدرة الاحتياطية المركبة في كل شبكة ، وبالتالي إلى تخفيض الاستثمارات التى تنفق لبناء محطات جديدة لتلبية الطلب ، دون المساس بدرجة الأمان والاعتمادية في الشبكات المرتبطة. ويؤدي الربط إلى التقليل من الاحتياطي spinning reserve الذى سنتحدث عنه لاحقا ، ويهدف الربط أيضا إلى الاستفادة من إقامة محطات التوليد في المواقع المناسبة لها ، بحيث تكون أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية نتيجة مثلا لتوفر وقود رخيص فائض صعب التصدير أو صعب التخزين في إحدى الدول المرتبطة .

ويهدف الربط أيضا إلى التقليل من تلوث البيئة ، فالجدير بالملاحظة أن معظم محطات التوليد الجديدة فى أوروبا على سبيل المثال تنشأ فى شرق أوروبا الفقير وليس فى غربها الغنى الذى يريد الكهرباء دون تلوث . وإدراكاً لهذه الفوائد ، فقد قام عدد محدود من الدول العربية منذ أوائل الخمسينيات بربط شبكاتهم الكهربائية.

ففي المغرب العربي ، على سبيل المثال ، تم ربط الجزائر بتونس بدءاً من عام 1952 بخط ربط على جهد 90 ك.ف. وذلك لأغراض الطوارئ فقط ، مثل حدوث أعطال فنية أو عند ارتفاع الطلب بصورة مفاجئة في إحدى

الشبكات يمنعها من توفير الطاقة للأحمال الموجودة على شبكتها. وتم ربط المغرب والجزائر بخط ربط على جهد 220 ك.ف في عام 1979. وبالإضافة إلى الربط القائم بين الجزائر والمغرب على جهد 220ك.ف. ، قامت الدولتان أيضاً بربط شبكات الكهرباء فيهما ، على جهد 400 ك.ف. ، وذلك من خلال خط هوائي بقدرة حوالي 900 MW. وقد دخل هذا الخط في الخدمة عام 2009.

أما دول الخليج فإنهم يرتبطون معا بشبكة واحدة أيضا ، ويوضح الشكل 1-1 المخطط العام لشبكة الربط لدول مجلس التعاون الخليجي. وقد نفذ مشروع الربط على ثلاث مراحل ، بحيث تم في المرحلة الأولى ربط محطة الزور في الكويت بمحطة الفاضلي في المملكة العربية السعودية ، وبمحطة الجسرة في البحرين ، ومحطة الدوحة الجنوبية في قطر ، كل ذلك على جهد 400 ك.ف. وتشكل هذه الخطوط الجزء الشمالي من الربط. أما في المرحلة الثانية ، فتم ربط شبكات الإمارات وعمان ، التي تشكل الجزء الجنوبي. وفي المرحلة الثالثة ، يتم ربط الجزء الشمالي بالجزء الجنوبي.

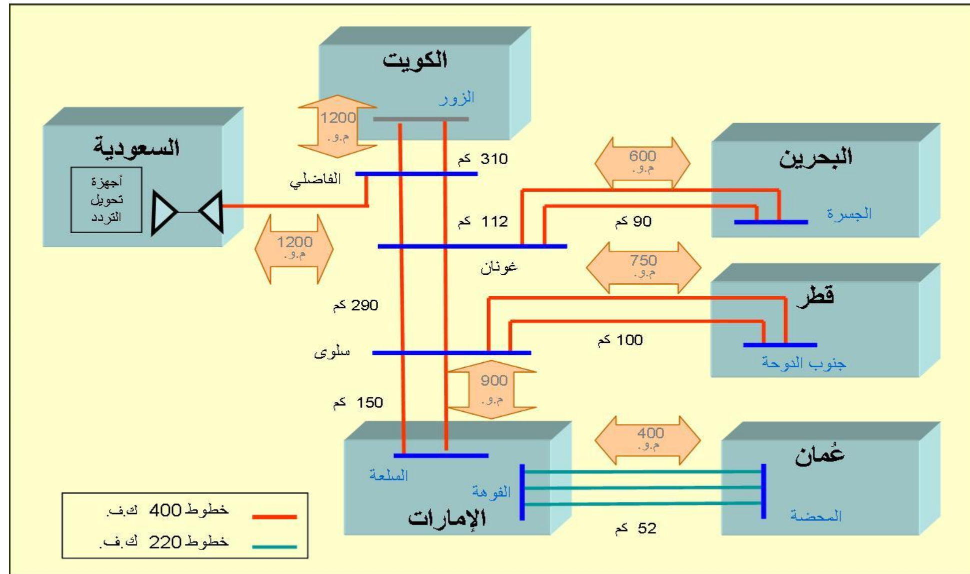


Figure 1-1 شبكة الربط الخليجى الموحدة

وتوجد حاليا شبكة ربط للكهرباء في مصر والأردن وسوريا ولبنان وليبيا وفلسطين (تم الربط بين الشبكة الكهربائية الاردنية مع الشبكة الفلسطينية من خلال مغذي 33 ك.ف من محطة تحويل السويمة بالأردن إلى أريحا بفلسطين ، وهناك ربط هوائى بين غزة مع مصر) ، وكان يفترض ضم العراق وتركيا ولكن حالت الظروف السياسية دون ذلك ، والشكل 1-2 يمثل المخطط العام المفترض لمشروع الربط بين هذه الثمانية دول.

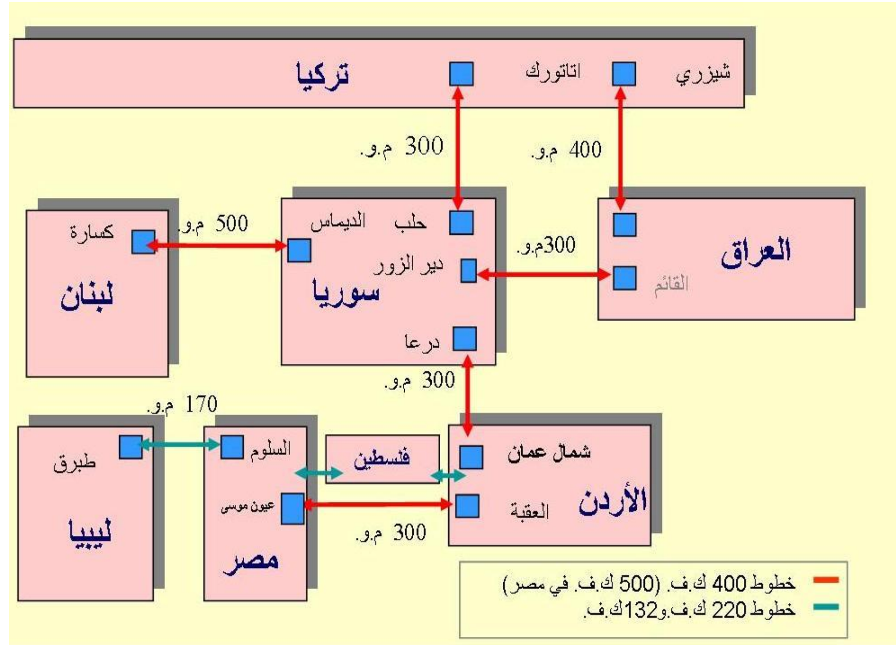


Figure 1-2 شبكة الربط الثمانى

وتفصيليا ، ترتبط مصر كهربيا بالأردن منذ عام 1998 ، عن طريق خط هوائي جهد 500 kV يعبر سيناء من السويس حتي الحدود المصرية في طابا ، ثم تتصل فى المرحلة الأخيرة بشبكة الأردن من خلال خط هوائى بطول 18 كم ثم كابل بحري بطول 13.3 كم لعبور خليج العقبة على عمق 850 م إلى نقطة الربط بالشبكة الأردنية على جهد 400 kV ، وهذا الكابل البحرى مكون من أربعة فازات (ثلاثة فى الخدمة والرابع احتياطى يستخدم عند خروج أى Phase لدواعى الصيانة أو بسبب عطل) . وتتضمن منظومة الربط أيضا محطات محولات بكل من السويس و طابا. (ملحوظة : الأردن مرتبط بسوريا ، وسوريا مرتبطة بلبنان ، وهذا يعنى أن جميع هذه الدول مرتبطة بمصر).

كما تم تنفيذ الربط أيضا بين مصر و ليبيا على جهد 220 KV ، و تم التشغيل في 28 مايو 1998 ، و كان بين محطة مطروح في مصر و محطة طبرق في ليبيا. والجزء الخاص بالربط مع ليبيا يبدو على شاشات مركز التحكم القومى كما فى الشكل 1-3 .

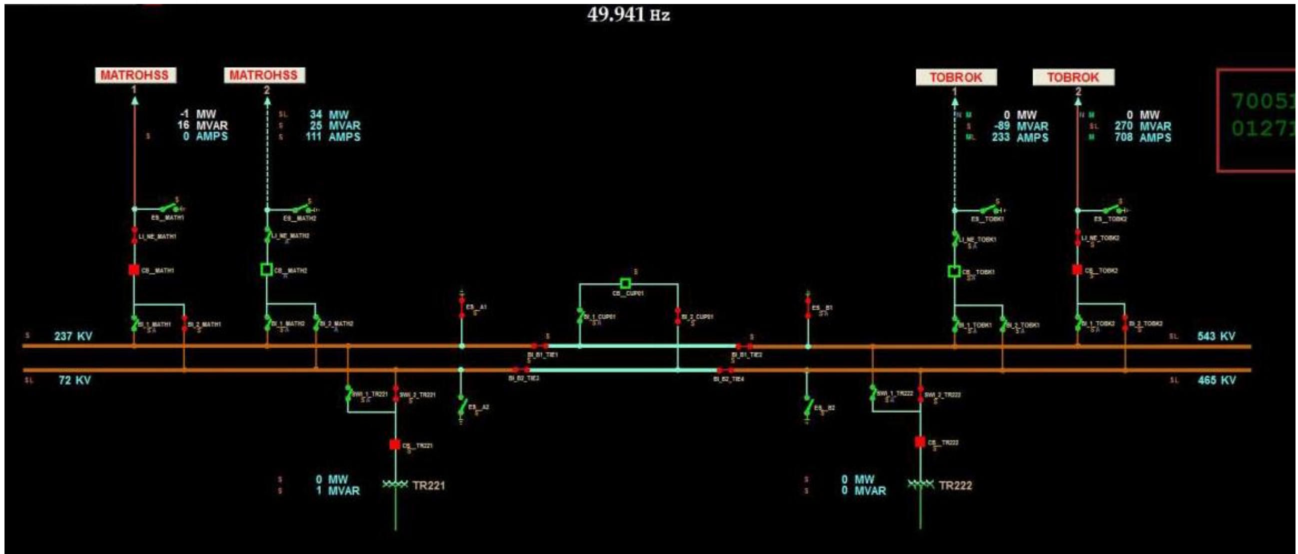


Figure 1-3 الربط مع ليبيا على شاشات مركز التحكم

والميزة الأساسية لهذا الربط يظهر بقوة عند حالات الـ Blackout (الإظلام التام) حيث يفيد هذا الربط فى عملية الـ Restoration (استعادة الطاقة) . وأحيانا تظهر أهميتها فى تبادل الطاقة وقت الذروة ، لكن هذه الميزة لا تظهر إلا إذا كانت الدول المشتركة متباعدة فى خطوط الطول حتى لا تحدث الذروة فيها فى وقت واحد فتصعب عملية التبادل (مالم تكن الدولة لديها إنتاج كبير يفوق استهلاكها الأقصى ، كما هو الحال مثلا فى قطر التى لديها حوالى 3 جيجاوات فائض إنتاج وهى أكبر دولة عربية فى فائض الإنتاج) ، أما فى الظروف العادية فحجم التبادل بين الدول محدود كما يظهر من الجدول 1-1.

Table 1-1 القدرة المتبادلة بين دول الربط

<table>
<tr><th>البيان</th><th>خط الربط المصري الليبي</th><th colspan="3">خط الربط المصري الاردني</th></tr>
<tr><td>جهد الربط (ك.ف)</td><td>220</td><td colspan="3">400</td></tr>
<tr><td>دول الربط</td><td>ليبيا</td><td>الاردن</td><td>سوريا</td><td>لبنان</td></tr>
<tr><td>الطاقة المباعة (صادرة) (ج.و.س)</td><td>100</td><td>1277</td><td>220</td><td>82</td></tr>
<tr><td>الطاقة الواردة (ج.و.س)</td><td>64</td><td>26</td><td>2</td><td>-</td></tr>
</table>

1.1.3 نماذج للشبكات الموحدة

الأشكال التالية تمثل نماذج لشبكات بعض الدول (بعض هذه الأشكال يحتاج لتحديث لأن معظم الدول تتطور فيها شبكات الكهرباء سنويا). فالشكل 1−4 يمثل جزءا من شبكة الـ 300kV بالكويت ، ويلى ذلك الشكل 1−5 الذى يمثل أجزاء من الشبكة السعودية ثم الشبكة الأردنية ، ثم الشكل 1−6 وفيه الخطوط العامة لشبكة الولايات المتحدة الأمريكية ، وأخيرا الشكل 1−7 والذى يمثل الشبكة المصرية (جهد 500 وجهد 220 ك ف) التى ندرسها بعد ذلك بشئ من التفصيل.

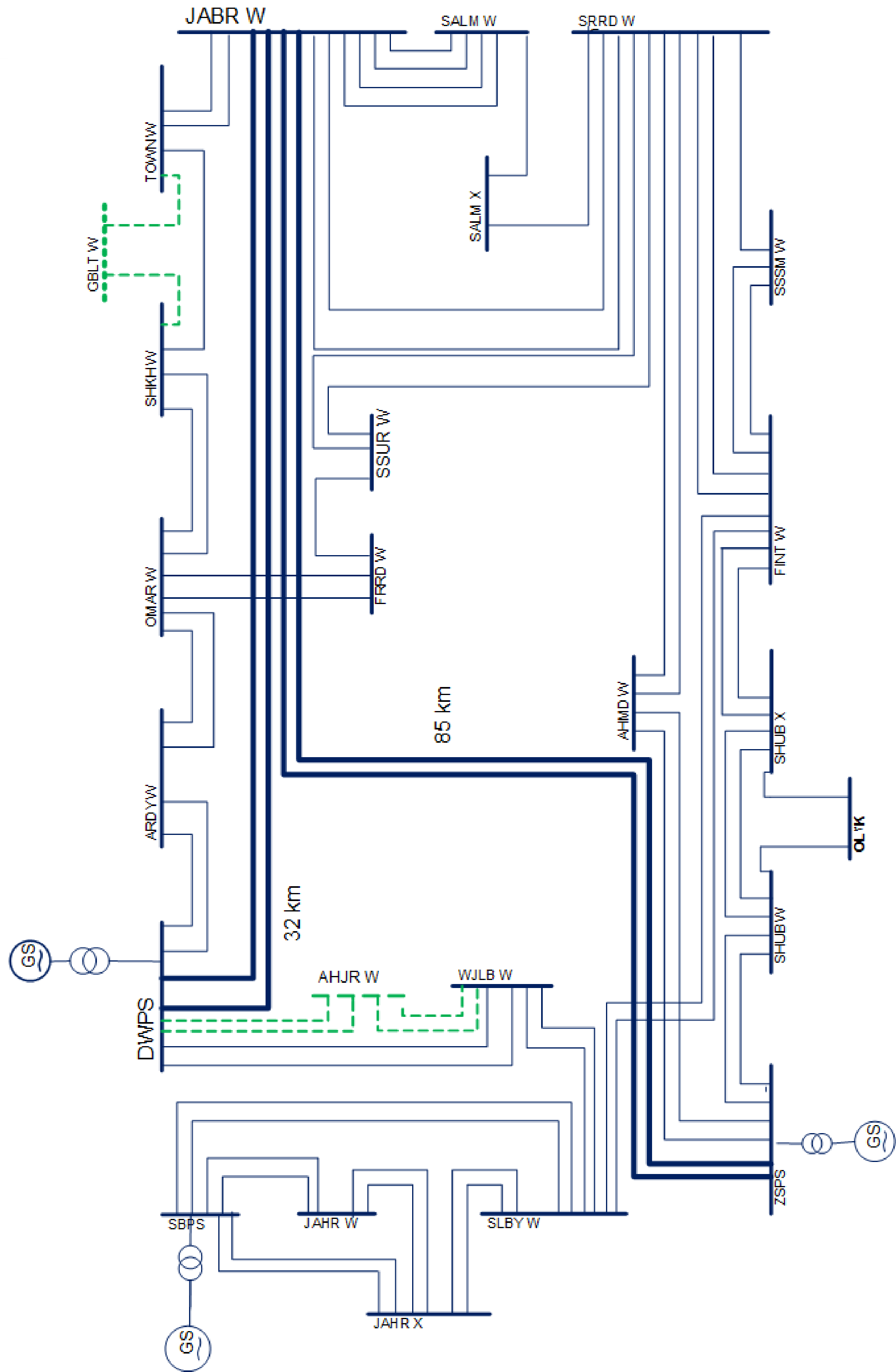


Figure 1-4 جزء من شبكة الكويت



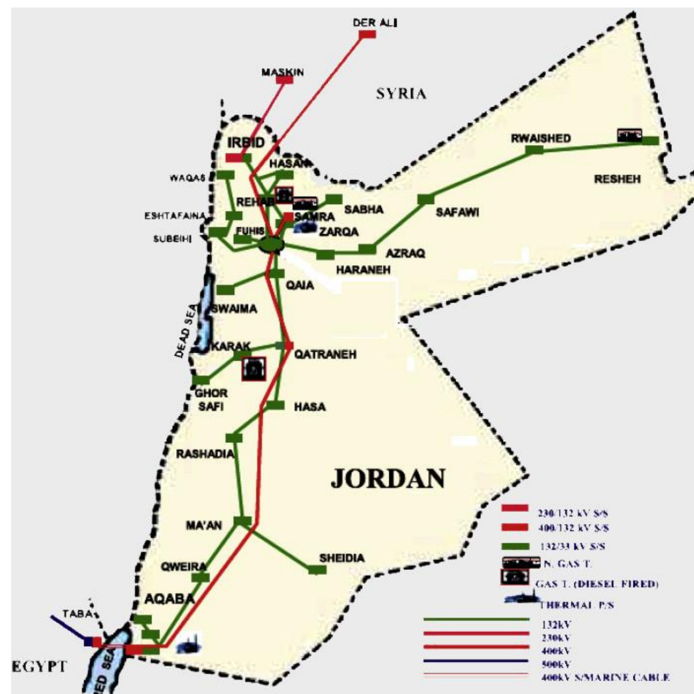
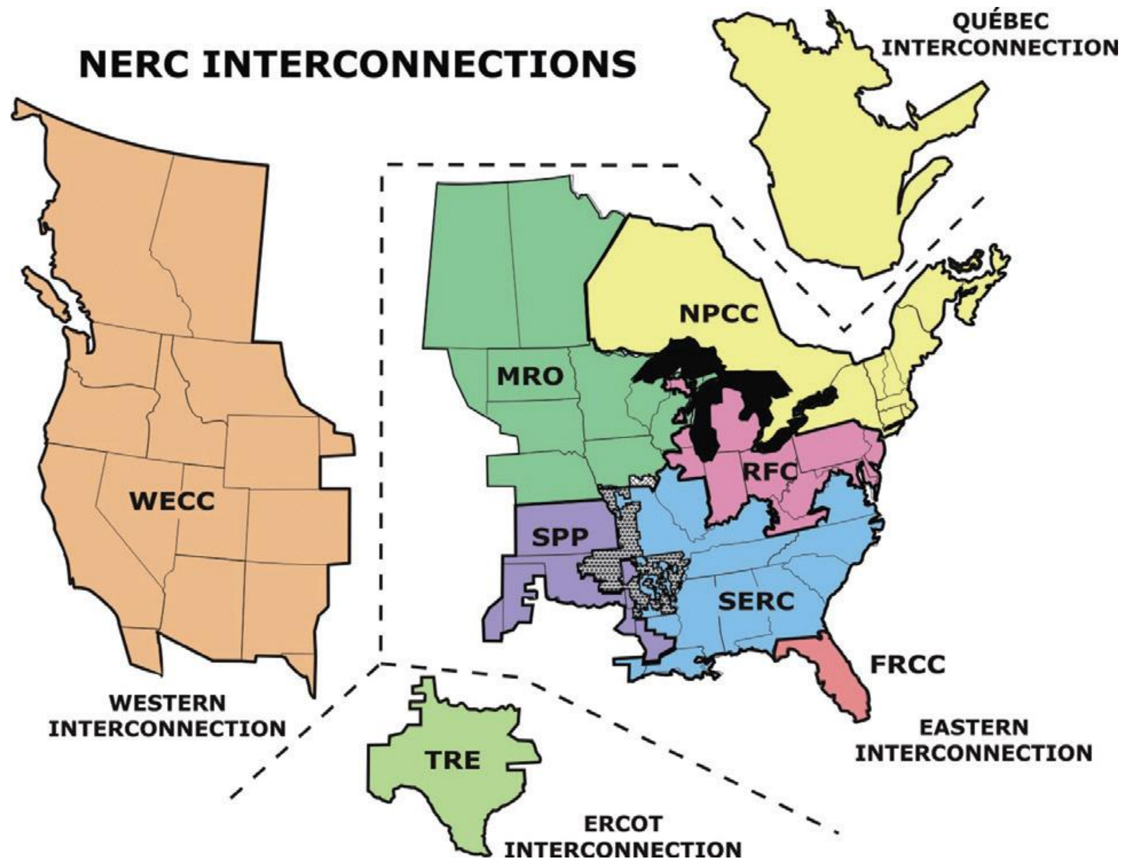


Figure 1-5 أجزاء من الشبكة السعودية والشبكة الأردنية

لاحظ فى الشبكة السعودية أنها مقسمة إلى عدة شبكات موحدة مرتبطة معا ، فكلما تضخمت الشبكة صعب أن يقوم مركز واحد بمتابعتها كوحدة واحدة ، ولكن بالطبع يوجد ربط بين هذه الشبكات المنفصلة.

وهذه النقطة تظهر بوضوح أكثر فى شبكة أمريكا الشمالية (أمريكا وكندا) وهما معا يمثلان أكبر شبكة كهربية موحدة فى العالم ، مع ملاحظة أنها فى الواقع تتكون من أربع شبكات شبه معزولة عن بعضها ، وأقول ذلك لأنه بالفعل هناك خطوط ربط HVDC بين الشبكات الأربعة ، كما فى الشكل 1-6.

(ملحوظة : فى الفصل السابع سنتعرف على السبب فى استخدام الـ HVDC فى الربط بين هذه الشبكات وليس باستخدام HVAC .)



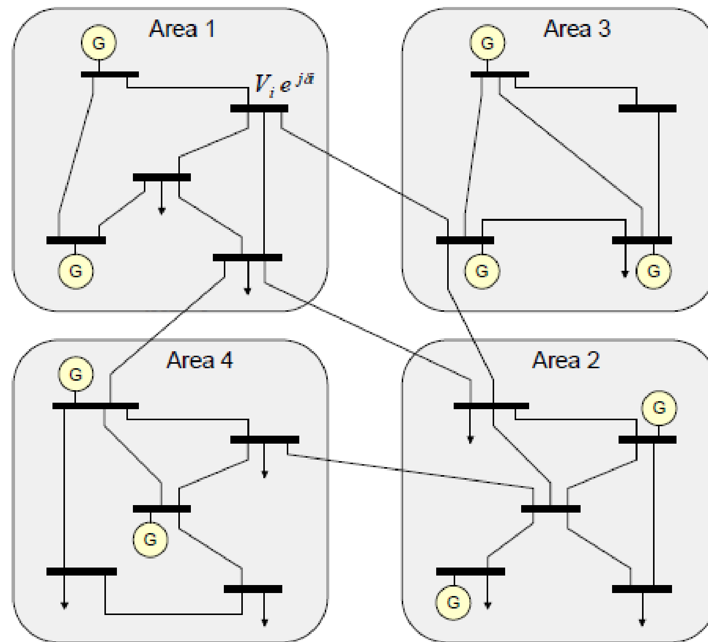
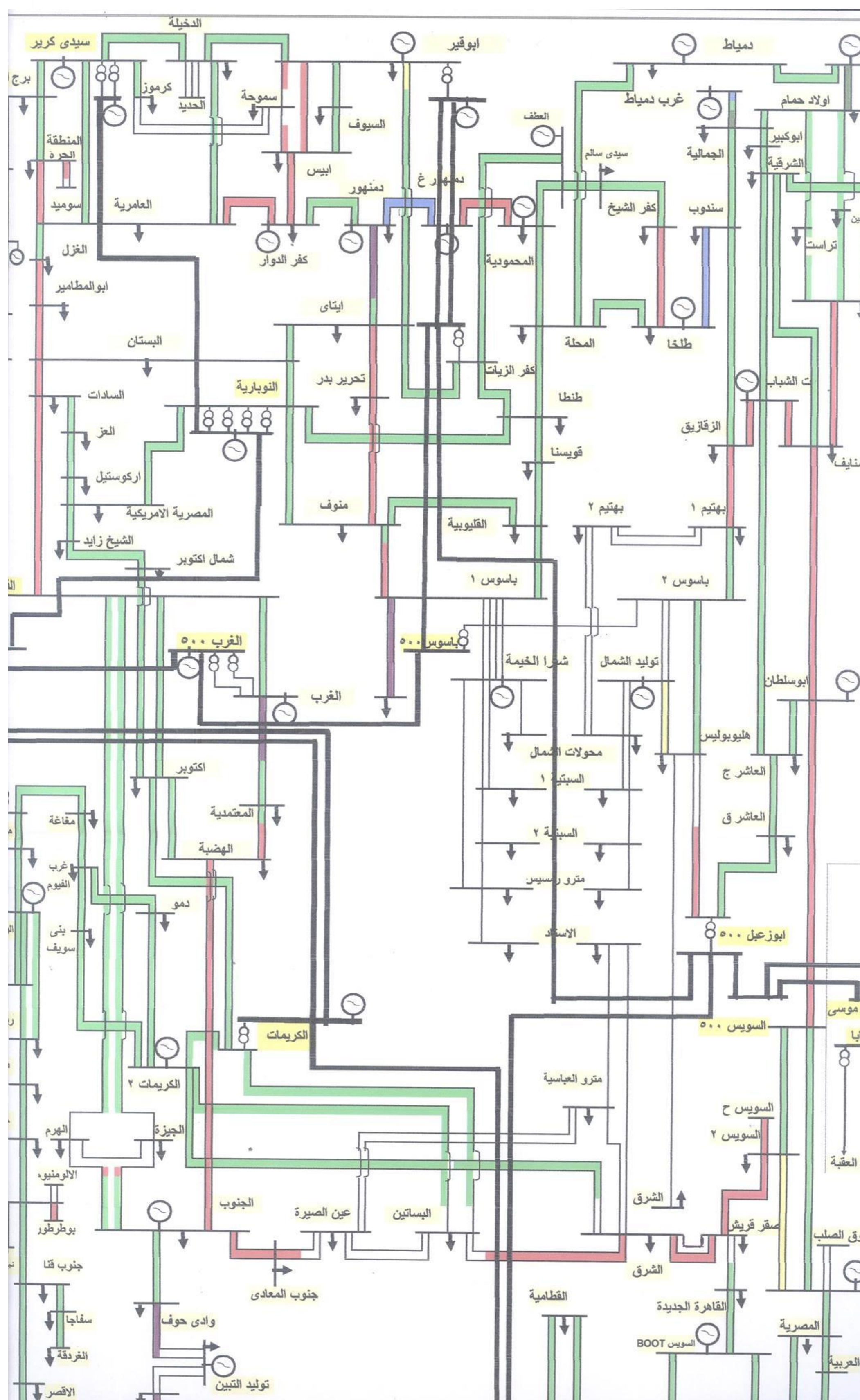


Figure 1-6 مخطط الشبكة الموحدة بأمريكا

فى الشكل 1–7 نجد الشبكة الموحدة فى مصر ، والتى ندرسها هنا بشئ من التفصيل.



جزء من الشبكة الموحدة بمصر جهد 500 وجهد 220 ك ف Figure 1-7

والشكل 1−8 يمثل أماكن المحطات جغرافيا فى مصر ومسارات خطوط الجهد العالي.

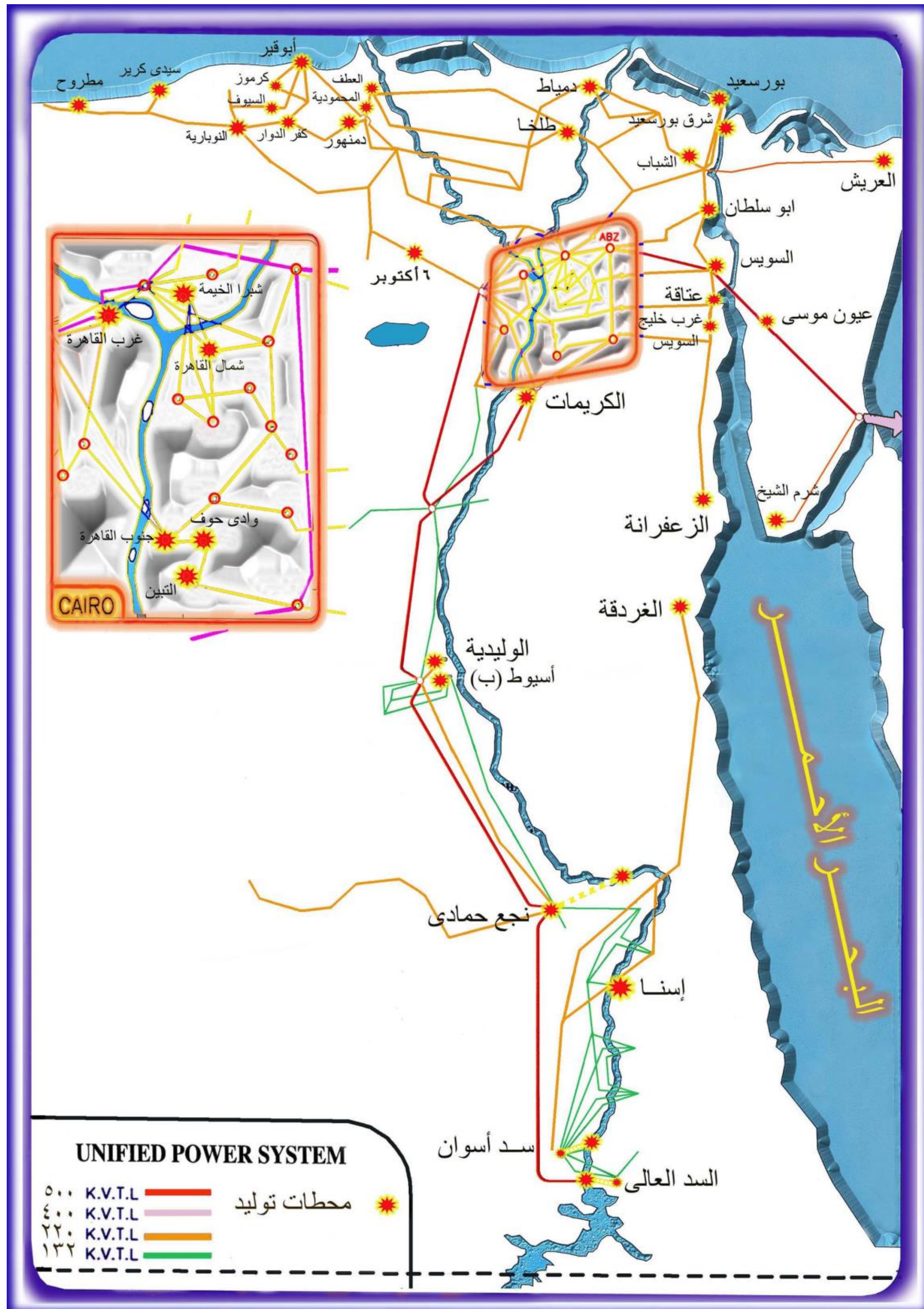


Figure 1-8 التوزيع الجغرافى لمحطات التوليد فى مصر

لاحظ فى الشبكة المصرية أن جميع محطات التوليد فيها (34 محطة فى مصر) مرتبطة جميعا معا بخطوط نقل كما فى الشكل 1-7 ، وتظهر بعض محطات التوليد متصلة بالخطوط جهد 500kV (الخط الأسود العريض فى الشكل) ، والبعض الآخر بالخطوط جهد 220kV (خطان رفيعان).

ملحوظة:

لا يوجد سوى عدد قليل من محطات التوليد التى تتصل مباشرة بجهد 66kV فى مصر مثل وادى حوف – الشباب – السيوف – مرسى مطروح – الكريمات الشمسية ، وهناك عدد محدود جدا من المحطات يتصل على شبكة الـ 11kV مثل كرموز – سملوط – الشرق – البساتين ، واستخدامهم الأساسى لتحسين انتظام الجهد فى شبكة التوزيع.

1.1.4 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية

1- معظم الطاقة الكهربية المولدة فى مصر تأتى من الشمال (أبو قير والنوبارية وسيدى كرير ودمياط والمحمودية إلخ) بينما تعتبر القاهرة ، وهى العاصمة ، بمثابة مصب لمعظم الطاقة المولدة.
2- أكثر المناطق تأمينا هى وسط البلد (داخل القاهرة) حيث كل محطة محولات Substation يأتيها التغذية من جهتين مختلفتين.
3- مناطق الصعيد الأكثر فقرا فى الطاقة ، فقبل افتتاح محطة الوليدية كانت المحطات المائية فى أقصى الجنوب تمثل المصدر الوحيد للتغذية فى هذه المناطق ، وكان هذا يمثل عيبا كبيرا فى الشبكة ، وقد بدأ علاج ذلك جزئيا ، لاسيما بعد افتتاح محطة أسيوط الجديدة.

1.1.5 الفقد فى الشبكات

قد يسأل سائل : أليس من المتوقع أن يكون هناك فقد كبير فى القدرة الكهربية نتيجة طول الخطوط وامتداها لربط هذا العدد الكبير من محطات التوليد ؟ والإجابة نعم هناك فقد فى الطاقة لكن هناك أيضا إجراءات لتخفيض هذا الفقد ، منها بالطبع استخدام الجهود الفائقة فى النقل ، فكلما زاد الجهد قل التيار وقل الفقد . وأقل دولة عربية فى نسبة الفقد فى الطاقة حسب إحصائيات البنك الدولى هى قطر (2% فقط) ، بينما تبلغ نسبة الفقد فى الطاقة فى مصر حوالي 11% ، وهى نسبة مرتفعة جدا مقارنة بالمعدل فى كثير من الدول الذى يدور حول 5% كما فى الشكل 1-9.

ويرجع السبب فى ارتفاع نسبة الفقد إلى عوامل فنية مثل الـ Power Losses لاسيما فى خطوط ومحولات التوزيع ، وكذلك تأثير كفاءة المعدات وقدم المحطات ، ولكن النسبة الأكبر منه ترجع (لاسيما فى حالة النسب المرتفعة جدا) إلى عوامل غير فنية مثل السرقات والعشوائيات وأخطاء العدادات وعدم التحصيل ، إلخ. وبسبب هذه العوامل غير الفنية تصل نسبة الفقد فى دول أخرى إلى أكثر من 40 % .

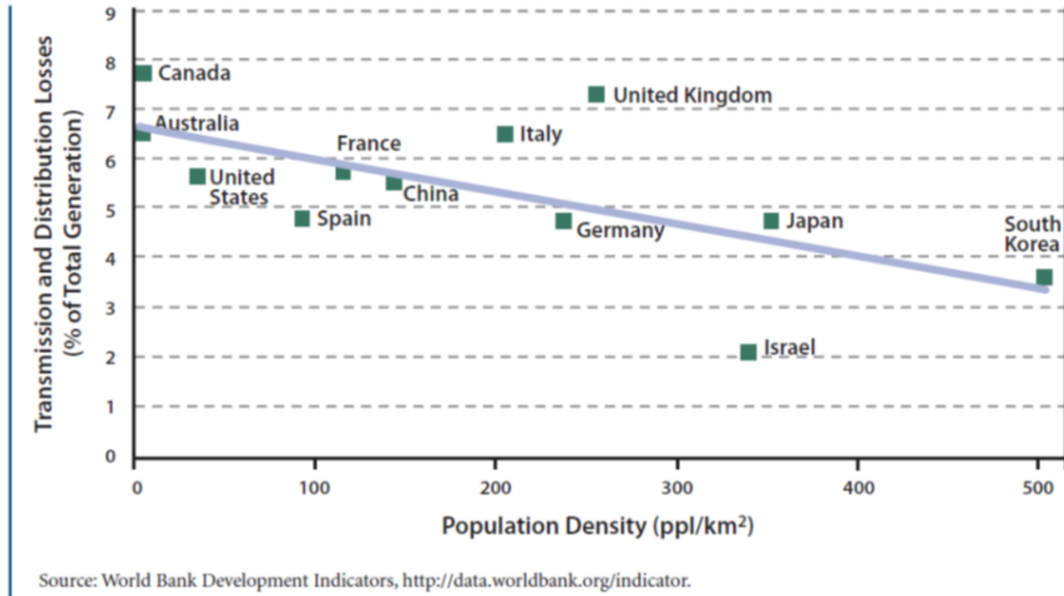


Figure 1-9 نسب الفقد فى القدرة فى شبكات بعض الدول

1.1.6 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟

بالطبع سيتوقف ذلك على حجم الحمل المتصل ، حيث يقوم مركز التحكم يوميا بعمل دراسة للحمل المتوقع ، وتحديد عدد وحدات التوليد وعدد المحطات الكافية لتغذية هذا الحمل المتوقع وجعل هذه المحطات فى الخدمة حتى لو كانت تعمل No Load ، بحيث إذا زاد الحمل فجأة يجد الشبكة جاهزة لتغذيته لحظيا ، وهذا ما يعرف بالـ Hot Spinning Reserve ، وسمى كذلك لأنه يمثل قدرة توليدية in operation لكنها ليست in service ، أى ليست فى الخدمة رغم أنها تعمل ، علما بأن اختيار عدد ونوعية المحطات يخضع لمتغيرات عديدة أهمها :

1- الحمل المتوقع هذا اليوم ، وهذا يتوقف على تسجيلات الأحمال فى اليوم السابق وقيمة الحمل المقابل فى نفس هذا اليوم من الأسبوع الماضى (لتشابه الأنشطة) وكذلك بيانات الأرصاد التى تصل لمركز التحكم يوميا.
2- تكلفة التشغيل ، فالمحطات التى تنتج kWH رخيصة تكون دائما مخصصة لتغذية ما يعرف بالـ Base Load وهو الحد الأدنى من الأحمال المتصلة بصفة دائمة بالشبكة على مدار الـ 24 ساعة يوميا وطوال السنة مثل المحطات الحرارية والنووية. تستخدم أيضا فى تغذية الـ Base Load المحطات التى تحتاج لوقت طويل حتى تبدأ فى إنتاج الطاقة .
3- سرعة الاستجابة ، فالمحطات الغازية والمائية تعرف بسرعة دخولها فى الخدمة (عدة دقائق) فهذه دائما تخصص لتغذية أحمال الـ Peak Load وهى الأحمال التى تدخل للخدمة وقت الذروة لعدة ساعات وربما لعدة دقائق فقط. مع ملاحظة أن الوحدات المائية هى الأسرع على الإطلاق فى الدخول للخدمة

، فهى تحتاج فقط إلى 3 أو 4 دقائق ، أما الغازية فتحتاج حوالى 15 إلى 30 دقيقة حتى تعطى قدرتها كاملة ، ولذلك فعند حدوث أى تغير فى التردد نتيجة دخول أحمال مفاجئة (مثل الأحمال الصناعية) فإن مركز التحكم القومى فى مصر National Control Center ، NCC يبدأ بتشغيل المحطات المائية (السد العالى) أولا ، إن كان ذلك متاحا طبقا للترتيبات مع وزارة الرى ، وإلا فيلجأ للمحطات الغازية لضبط التردد.

والعاملين السابقين أساسيين فى حساب ما يعرف بالـ Unit Commitment أى تحديد الوحدات المناسبة لحمل ما وهى عملية رياضية معقدة نسبية لذا تحتاج إلى ما يعرف بالـ Optimization Techniques من أجل تنظيم جدول تحميل الوحدات المختلفة بالشبكة. ولتحديد الحمل الاقتصادى على المولد نلجأ إلى ما يعرف بحسابات الـ Economic Load Dispatch .

4- تقليل الفقد فى الشبكات ، فاختيار المحطات القريبة من الأحمال سيوفر فى كمية الـ Power Loss

5- نوعية الوقود ، أحيانا تكون مضطرا لتشغيل محطة ما لا تحقق كل المكاسب السابقة لأن البديل لها غير متوفر بسبب نقص الوقود المتاح مثلا ، كأن تلجأ لتشغيل محطات بالمازوت بدلا من الغاز لعدم توافر الغاز الطبيعى أو نقص امداداته.

والشكل 1-10 والشكل 1-11 يمثلان نموذجين لنسبة مشاركة كل محطة كهربائية في القدرة الكهربية الإجمالى ة (القدرة الفعالة وغير الفعالة) في يوم (26 نوفمبر 2015) طبقا لمركز التحكم القومي فى مصر لنقل الكهرباء.

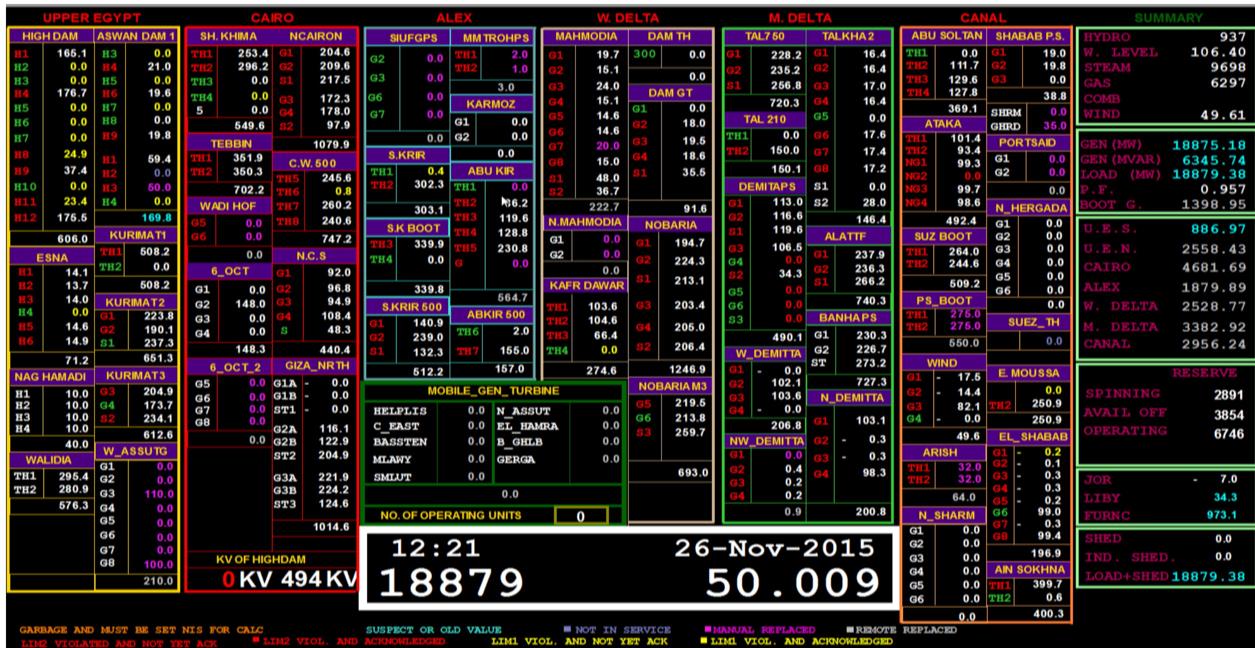
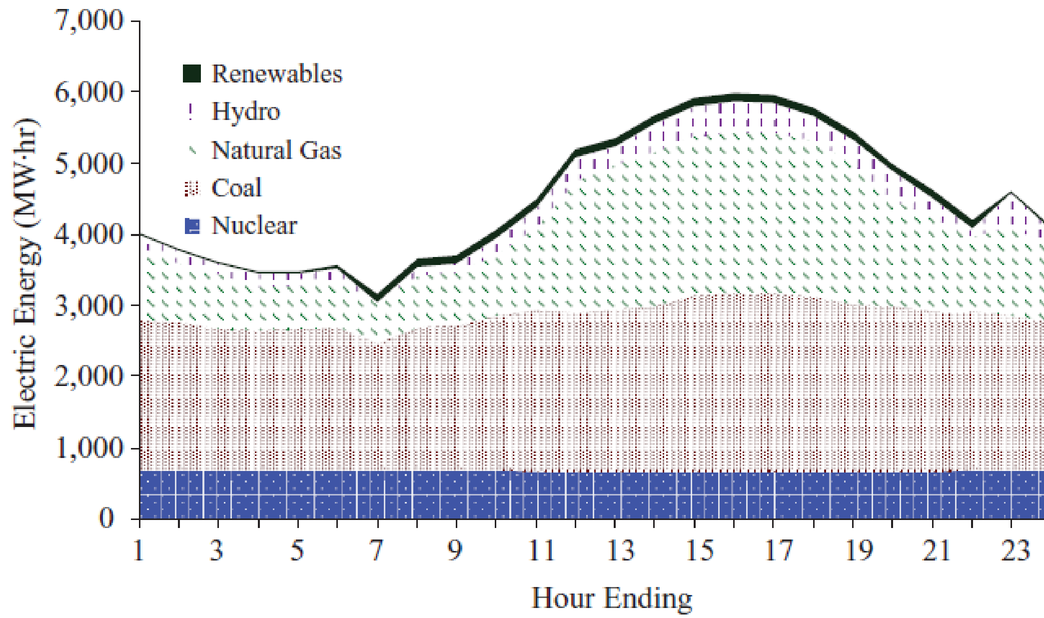


Figure 1-10

Figure 1-11 قراءات كافة المحطات (ووحدات التوليد بكل محطة) كما تظهر على شاشات المركز القومي للتحكم

والشكل 1−12 يعطى نموذجا لترتيب دخول نوعيات محطات التوليد فى الخدمة حسب تزايد الحمل فى يوم من أيام الصيف فى أمريكا. لاحظ أن المحطات التى تخدم الـ Peak load أهمها المائية ومحطات الطاقة المتجددة.



توزيع محطات التوليد المختلفة على منحنى الأحمال بأمريكا Figure 1-12

لاحظ فى الشكل السابق أيضا حجم التنوع فى مصادر الطاقة هناك من نووى وغازى ومتجدد ومائى.

والشكل 1-13 يؤكد هذه الملحوظة .

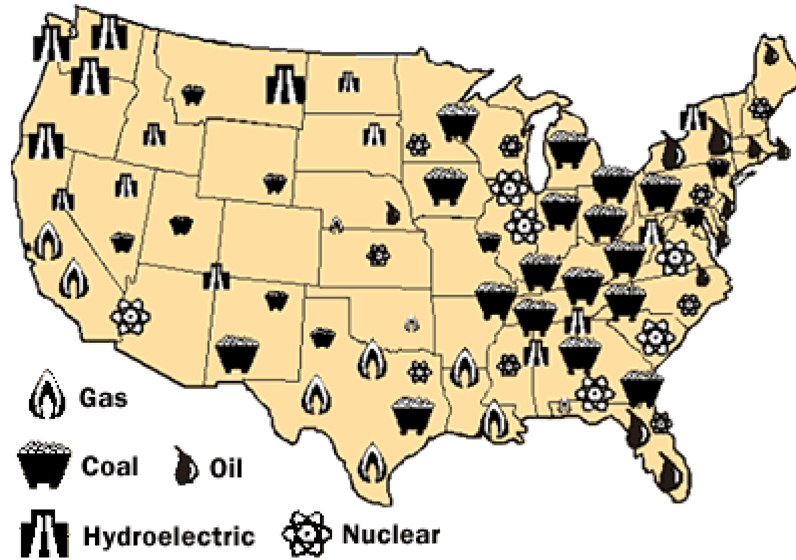


Photo courtesy U.S. Department of Energy
A breakdown of the major power plants in the United States ، by type

Figure 1-13 تنوع مصادر الطاقة فى محطات الكهرباء بأمريكا

وأهمية هذه الملحوظة تظهر من معرفة أن نقطة الضعف الأساسية فى معظم الشبكات العربية ومنها مصر ، هو أنها تعتمد تقريبا على مصدر واحد للطاقة الكهربية (المحطات الحرارية التى تعمل بالغاز أو المازوت) ، وبالتالى حين نفقد هذا المصدر الوحيد لأى سبب تحدث أزمة كما حدثت فى مصر صيف 2013 و 2014 . بينما احتمالية حدوث ذلك فى شبكة مثل أمريكا مستبعد تماما كما هو واضح من المخطط السابق.

1.1.7 ما المقصود بالـ Spinning Reserve ؟

المقصود هو أنه لو كان لدينا مولد مثلا بقدرة 100 ميجاوات ويغذى فقط حمل قدره 40 ميجاوات ، و كان بالشبكة محطة توليد أخرى صغيرة بقدرة 30 ميجاوات وتعمل متزامنة مع المحطة الأولى وتعرضت لعطل فخرجت من الخدمة . نقول أن المولد الأول لديه فائض قدرة Hot Spinning Reserve يقدر ب 40-50 ميجاوات ومن ثم يستطيع أن يعوض بسرعة خروج هذه المحطة (لكن بالطبع سيتوقف ذلك على Inertia الخاصة به كعنصر ثانى بالإضافة للقدرة المتوافرة).

لاحظ أنه يسمى Hot Spinning reserve لأنه يمثل قدرة توليدية in operation ، لكنها ليست in service ، أى ليست فى الخدمة. وبالطبع هذا يختلف عن Cold Spinning Reserve ، والذى يقصد به المحطات المفصولة لكن يمكن استدعائها للخدمة.

مزيد من التفصيل حول هذا الموضوع تجده بالباب السادس من هذا الكتاب.

بالطبع لو كان المولد محملا بقدرة 90 ميجاوات مثلا فلا نستطيع أن نقول أن لدينا أى فائض Reserve ، ونكون أمام مشكلة استقرار حقيقية قد يكون حلها هو الـ Load Shedding .

(راجع الشكل 1-10 و 1-11 لترى كيف تظهر قيمة الـ Spinning reserve على شاشات مركز التحكم)

1.2 كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟

من الشكلين السابقين 1-10 و 1-11 المأخوذين من المركز القومى للتحكم بمصر تبين أن كل محطة تشارك بنسبة معينة من الحمل الكلى على الشبكة ، وسنحاول هنا أن نجيب على سؤالين مهمين:

السؤال الأول : كيف يعرف المولد أن الحمل المتصل عليه قد زاد أو نقص؟
والسؤال الثانى : كيف يمكنه أن يغير ظروف تشغيله بعد أن عرف أن الحمل قد زاد أو نقص؟

نعلم أن العلاقة بين القدرة المولدة من هذا المولد والحمل Load المتصل به تحكمها العلاقة التالية:

P (mechanical) = T (mechanical) × ω = P (Electrical)

ومن هذه المعادلة يمكن فهم ما يحدث عند تغير الأحمال (وسنأخذ المحطات البخارية كمثال هنا) .

ففى الوضع الطبيعي يكون العزم الكهربي والميكانيكى متساويين عند سرعة الدوران الثابتة ω ، ثم عند زيادة الحمل فإن Electric Torque يصبح أكبر من Mechanical Torque ، وينشأ عن ذلك انخفاض فى السرعة يتم اكتشافه بسرعة بواسطة (Management System) الذى يقوم بإرسال إشارة إلى كل من (Feed Water Control Valve) لدخول كمية مياه أكثر إلى الغلاية ، كما يتم إرسال نفس الإشارة إلى (Forced Draft Fan) وهي مراوح كبس الهواء لزيادة كمية أكثر من الهواء لاحتراق الوقود ، ومن ثم فإن الـ (Governor Valve) يسمح بمرور كمية أكبر من البخار إلى التربينة ، ومن ثم يزداد Mechanical Torque حتى يتساوى مع Electric torque فى قيمته الجديدة ويعود المولد إلى الاتزان مرة أخرى.

ويجب أن تظل السرعة ثابتة لأنها مرتبطة بعلاقة وثيقة بـ Frequency حسب المعادلة:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

حيث f هى التردد و p عدد الأقطاب و n هى السرعة

1.2.1 التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال

يعتبر التردد هو المؤشر الحقيقى على حالة التوازن بين الـ Load Demand و بين الـ Supplied Power.

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد يدل على وجود اتزان بينهما واستقرار فى الشبكة ، غير أن التغير البسيط فى التردد شئ طبيعى ومقبول إذا كان فى مدى صغير ، فإذا زاد عن ذلك المدى الصغير فيمكن التحكم فيه أتوماتيكيا بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير أكثر من ذلك فربما نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد مدى التغير جدا فربما نصل فى النهاية إلى الفصل التام للمولدات نفسها وهو ما يؤدى إلى حدوث الإظلام التام Blackout.

Table 1-2 نسب فصل الأحمال بمصر حسب التردد

التردد Hz	نسبة فصل الحمل
49.2	%2
49.1	%3
49	%4
48.9	%7
48.8	%15
48.7	%20
48.6	%22

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول نسب فصل الأحمال عند كل تغير فى التردد يختلف من بلد لآخر. والجدول 1−2 يمثل حدود ونسب الفصل فى مصر.

1.2.2 كيف يحدث الـ Blackout ؟

من الأخطار التي تهدد الشبكة الكهربية حدوث ما يسمى بالإظلام التام أو الـ Blackout ، وتمثل حالة فشل الشبكة في الحفاظ على ثبات الجهد والتردد مما يؤدي إلى خروج كل وحدات التوليد من الخدمة ومن ثم انقطاع الكهرباء عن كل الأحمال.

والشبكة الكهربية كما نعلم مكونة من محطات توليد متصلة ببعضها البعض لتغذي الأحمال الكهربية ، لكن الشئ الغريب فيها أنه لا يوجد عنصر واحد من عناصر الشبكة الكهربية يمكنه أن يخزن الطاقة ، وبالتالي ففترة تخزين الكهرباء هى صفر ، بمعنى أن الطاقة المولدة مستنفذة دائما لحظيا ، مع ملاحظة أن سرعة مرور الكهرباء من المصدر للحمل هى سرعة الضوء ، أى أن كل شئ يتم لحظيا .
ولابد من استمرار التوازن بين الطلب والتوليد : فهناك طلب من ملايين المستهلكين الذين لديهم أحمال تحتاج إلى قدرة فعالة P (MW) ، وأحمال أخرى تحتاج إلى قدرة غير فعالة Q(MVAR) و في نفس اللحظة مطلوب من محطات التوليد توفير هذه الطلبات لحظيا . إذن فهو نظام شديد التعقيد ، وبمجرد أن يختل هذا التوازن تسقط المنظومة كلها ويحدث الإظلام التام.

ولنفترض على سبيل المثال أنه فى وقت من أوقات الذروّة ، حيث الشبكة تعمل على أقصى قدرة توليد ممكنة ، ثم لسببٍ ما حدث عطل فى محطة من محطات التوليد فتوقفت وخرجت من الخدمة فجائيا. فعندما تخرج هذه الوحدة يجب على الوحدات الأخرى أن تعمل وبسرعة على توفير الطاقة اللازمة لتعويض النقص الناشئ عن خروج تلك المحطة ، ولكننا فى وقت الذروة كما ذكرنا وكل الوحدات تعمل بأقصى قدرة ولا تستطيع أن تتحمل أي زيادة في الأحمال ، وعندما يبدأ حدوث زيادة فى تحميل المولدات (over load) فتلجأ نظم حماية هذه الوحدات إلى إخراجها من الشبكة حتى لا يحترق المولد فيزداد الوضع تعقيدا ، وقد تتوالى عمليات الخروج حتى نصل إلى الـ Blackout ، وهذا أحد سيناريوهات حدوث الـ Blackout .

1.2.3 خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration

أهم ملحوظة هنا أن تعرف أنك لكى تولد كهرباء فإنك تحتاج لكهرباء ، بمعنى أنه بعد حدوث الـ Blackout فإنه ليس بالسهولة أن تبدأ مرة أخرى فى تشغيل محطات التوليد ، لأن أى محطة لكى تبدأ فى العمل تحتاج لقدرة كهربية قد تصل لعدة ميجاوات لمجرد بدء تشغيل مساعدات المحطة (الإنارة وأنظمة التبريد والمضخات وأجهزة التحكم .... الخ). وحيث أننا فى حالة انقطاع تام للكهرباء فليس أمامك سوى طريقين لبدء تشغيل محطات التوليد:−

أ- إما بتشغيل المحطات التى بها وحدات توليد ديزل خاصة بفترة الـ blackstart ، فهذه هى التى تبدأ بالتوليد و الدخول على الشبكة لتغذية أحمال المساعدات Auxilaries فى باقى المحطات.

ب- أو يمكن فى هذه المرحلة الاستفادة من الربط الدولى لتمرير كمية من الطاقة إلى الشبكة من إحدى الدول المجاورة تكفى لبدء تشغيل مساعدات محطات التوليد لكى تستطيع المحطات أن تبدأ .

يتم بعد ذلك تقسيم الشبكة إلى جزر منفصلة ، بمعنى تقسيم الأحمال على المحطات الأقرب لها دون اتصال بين هذه الجزر ، ثم تجهيز الجزر المنفصلة للربط و إعادة تكوين الشبكة مع مرعاة شروط التوافق Synchrounization كما سنرى لاحقا حين الحديث عن ربط المولدات معا على التوازى.

1.3 طرق التحكم في التردد :

قبل الحديث عن طرق التحكم فى التردد نجيب أولا عن السؤالين التاليين :

1.3.1 لماذا الخوف من تغير التردد؟

زيادة التردد تعنى زيادة سرعة دوران المولد ، مما قد يؤدى إلى تحطم المولد. أما انخفاض التردد فيعنى انخفاض الجهد (تذكر أن $E = k f \varphi$) ، وانخفاض الجهد يؤثر بشدة على مساعدات المحطة Auxilaries (مثل المحركات وخلافه) والتى يمكن أن تحترق (لأنها تعتبر أجهزة ثابتة القدرة Constant Power Devices وهذا يعنى أن انخفاض الجهد عليها يؤدى حتما لارتفاع التيار بها) ، علما بأن انخفاض الجهد قد يتسبب أيضا فى احتراق الـ Rotor ، لأنه عند انخفاض الجهد سيتدخل الـ Automatic Voltage Regulator ، AVR ليرفع قيمة الجهد من خلال زيادة قيمة تيار الـ Rotor لينتج فيضا بكمية أكبر ، وهذا يمكن أن يتسبب فى احتراق ملفات الـ Rotor . ولاحقا سيتم شرح تفصيل هذه النقطة.

1.3.2 لماذا نستخدم نظام الـ 50 أو 60 هيرتز؟

هناك بعض الاسباب التى أدت إلى استخدام هذه القيم تحديدا ، وعدم استخدام ترددات أعلى فى أنظمة القوى الكهربية. ويمكن فهم ذلك بالنظر للمعادلة $F = \frac{n_s * p}{60}$ ، فإذا أردنا رفع التردد إلى 200 هيرتز مثلا فلدينا طريقان لتحقيق ذلك:

- الطريق الأول هو زيادة السرعة التى يدور بها الــ shaft ، وهذا يعنى أننا سنحتاج لكمية طاقة أكبر لزيادة السرعة لنفس كمية الكهرباء المتولدة ، كذلك سنحتاج لتصميم أقوى للـ shaft لتحمل القوة الناتجة من السرعة العالية.

- الطريق الثانى هو زيادة عدد الأقطاب فى المولد ، وبزيادته يزيد حجم المولد بشكل كبير.

ومن ثم فالطريقان مسدودان.

ناهيك عن تأثر كفاءة النقل باستخدام ترددات عالية حيث سيؤدى ذلك إلى ازدياد الفقد وانخفاض الكفاءة وانخفاض الجهد وذلك لأن قيم المعاوقات فى خطوط النقل ستزيد (تذكر أنها تتناسب طرديا مع التردد) وبالتالى سيزيد الهبوط فى الجهد

$$voltage\ drop = I * Z,\ \ X\ \alpha\ F$$

كذلك سيؤثر على ازدياد تأثير ظاهرتى الـ corona , skin effect

لذلك استقرت معظم الدول على50 أو60 هرتز. فهناك دول كالولايات المتحدة تعمل على 60 هرتز، أما أوروبا و دول أفريقيا ومنها مصر فتستخدم 50 هرتز، و يوجد بعض الدول كاليابان والسعودية بها النظامين .

1.3.3 استخدام الـــمنظم Governor فى التحكم فى التردد

هو مكون من مكونات أى نظام كهربى متصل بالشبكة الموحدة ، ودوره أن يحافظ على تردد المولد متساوياً مع تردد الشبكة الموحدة . و الـ governor ليس له شكل ثابت ولكنه دائما يظهر فى المحطة مع الجزء المسئول عن إدارة التربينة ، ففى المحطة البخارية يكون الـ governor عبارة عن صمام Valve للتحكم فى كمية البخار ، و فى المحطة الغازية يكون الـ governor عبارة عن بوابات للتحكم فى غرف الاحتراق ، أما فى المحطات الهيدروليكية فيمثل الـ Governor ببوابات التحكم فى المياه و لكن يتطلب من الـ Governor فى هذه المحطات قوة كبيرة جدا للتحكم فى هذه البوابات.

1.3.4 طريقة عمل الـــ Governor فى المحطات البخارية:

يقوم الـ governor بدور المتحكم فى السرعة عن طريق المقارنة بين إشارتين : الإشارة الأولى تتناسب قوتها مع سرعة المولد ، و الإشارة الثانية تتناسب مع تردد الشبكة الموحدة ، فإذا كانت إشارة المولد متساوية تماما مع إشارة الشبكة فإن الـ governor ليس له حاجة ، و لكن فى حالة زيادة تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتضييق فتحة صمامات البخار Governor Valves لترجع السرعة للسرعة التزامنية و بالتالي يتساوى التردد مع تردد الشبكة.

وفى حالة نقصان تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتوسيع فتحات صمامات البخار لترجع السرعة لطبيعتها و تتساوى مع تردد الشبكة. والصورة التالية فى الشكل 1-14 تمثل شكل وحدات التحكم فى الـ Governor بإحدى المحطات بمصر (يظهر بالصورة طلاب من دفعة 2003 هندسة القاهرة على ما أذكر

، وكانت هذه الصورة ضمن تقرير طلبت منهم أعداده عن زيارتهم لهذه المحطة ضمن مقرر محطات التوليد الذى كنت أدرسه لهم)

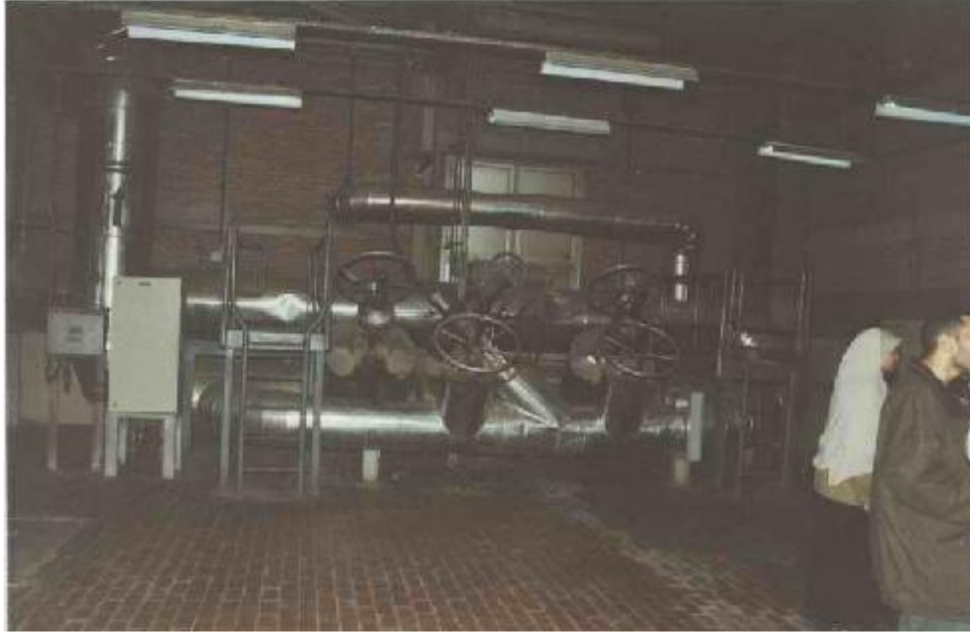


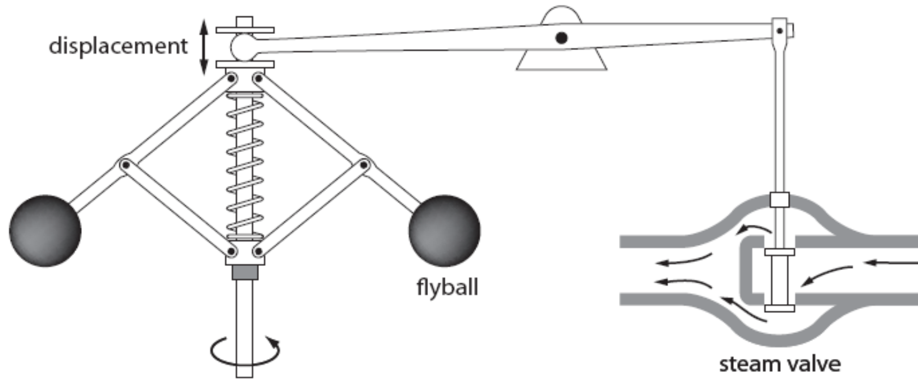
Figure 1-14 Governer

1.3.5 أنواع الـــ Governor :

1. النوع الميكانيكى و هو أقدم الأنواع و لم يعد يستخدم بكثرة .

فعند حدوث over load تقل السرعة فتقل قوة الطرد المركزى بين الكرتين Flyball فى الشكل 1-15 ، وتقل المسافة بينهما مما يؤدى إلى زيادة فتحة الـ steam valve فتزداد كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.

وعندما يقل الحمل تزداد السرعة وتزداد قوة الطرد المركزية بين الكرتين Flyball فتزيد المسافة بينهما مما يؤدى إلى ضيق فتحة الصمام البخارى فتقل كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.



فكرة عمل المنظم الميكانيكى Figure 1-15

2.النوع الكهربى : ويكون التحكم هنا عن طريق استخدام سرفوموتور و ذلك لاستجابته العالية و هو المستخدم بكثرة الآن .

3.النوع الإلكترونى و يتميز بالدقة العالية و لكنه غير عملى نظرا لأنه يوجد صعود و هبوط للحمل بصورة مستمرة و قد يسبب تلف للأجزاء الميكانيكية نظرا لعدم التكيف مع سرعة الأجزاء الإلكترونية.

1.4 ربط المولدات على التوازي بالشبكة

قبل بناء الشبكة الموحدة كانت دائما فكرة توصيل المولدات على التوازى تجذب الاهتمام ، فنحن نحتاج فى كثير من الأحيان إلى تشغيل مولدين أو أكثر على التوازي للحصول على عدة ميزات منها:

1- وجود العديد من المولدات يقلل كثيرا من احتمالية حدوث انقطاع للتيار الكهربى عن الأحمال ، بمعنى تحسين الاعتمادية Reliability لمنظومة الكهرباء ، فعند تعطل أو حدوث خروج فجائى لأي مولد لا يتسبب فى فقدان التغذية الكهربية للأحمال.

2- تشغيل عدة وحدات على التوازي يسمح بإجراء الصيانة الدورية دون حدوث ارتباك في تغذية الأحمال المطلوبة ، كما يساهم فى التقليل من تكاليف الصيانة وقطع الغيار.

3- سهولة تعديل القدرة المولدة تبعاً لزيادة الأحمال وحتى الوصول إلى الحمل الأقصى ، بمعنى أنه في بعض الأوقات تكون الأحمال ليست بحاجة إلى القدرة المركبة للتوليد بالكامل وعليه يمكن فصل بعض المولدات طالما أن بقية المولدات تلبي الحمل في هذه اللحظة .

4- التقليل من استهلاك الوقود (يلاحظ أن كمية الوقود المستهلك لوحدة توليد قدرة 400 كيلو وات مثلا تعمل عند 80% من السعة الكاملة (أي تغذي حمل قدرة 320 كيلو وات) ، هذه الكمية أقل من استهلاك الوقود فى وحدة توليد قدرتها 800 كيلو وات وتغذي نفس الحمل (320 كيلو وات) والذي يمثل في هذه الحالة 40% فقط من سعتها الكاملة.

5- لا يشترط أن تكون وحدات التوليد المتصلة على التوازي لها نفس السعة ، مما يحقق استخدام الماكينات بأقصى كفاءة لها مع تغير الأحمال على مدار الوقت .

وهو نفس المنطق ونفس الميزات حين الحديث عن ربط محطة توليد بشبكة الكهرباء موحدة.

1.4.1 ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟

وفي كلتا الحالتين سواء عند ربط مولدات معا على التوزاى فى منطقة معزولة عن الشبكة أو ربط المولدات معا داخل الشبكة الموحدة فلا بد من تحقق شروط معينة لتنفيذ عملية الربط على التوازي ، وذلك من أجل ضمان أن يساهم المولد المضاف بجزء من القدرة الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال ، وتسمى عملية الربط هنا بعملية التزامن ويطلق عليها فى مصر عملية "التسنيك" وهو اشتقاق مصرى من كلمة Synchronization ، وتعرف علميا بأنها هى عملية ربط كهربية بين المولدات و جعلها متطابقة فى الجهد و التردد و زاوية الطور Phase Angle و ترتيب الأوجه Phase Sequence .

1.4.2 شروط تحقق تزامن المولدات:

الشروط التالية ضرورية ولازمة لتحقيق التزامن بين مولدات:

1- تساوى فرق الجهد الخارج من المولدات

من المعروف أن الجهد الخارج من المولد يساوى:

$$E_o = \frac{N_{sta}\ \Phi_{rot}\ \omega}{\sqrt{2}}$$

وهذا يعنى أن العوامل التى تؤثر فى قيمة جهد المولد هى:

1. سرعة دوران العضو الدوار بالمولد ω
2. عدد لفات العضو الثابت Stator ، N_{sta}
3. شدة المجال المغناطيسى الناتج من الـ Rotor ، φ_{rot}

و بما أن سرعة العضو الدوار rotor يجب أن تكون ثابتة للحفاظ على ثبات التردد ، و بما أن عدد اللفات ثابتة حسب التصميم الأساسى ، ومن ثم لم يتبق لضبط قيمة الجهد الخارج من المولد عند ظروف التحميل المختلفة سوى التحكم فى تيار المجال المغناطيسى المار بالـ Exciter المركب على الـ Rotor ، ومن ثم التحكم فى شدة المجال و يتم ذلك بواسطة جهاز AVR (Automatic Voltage Regulator) و الذى يزيد من تيار Exciter عند نقصان جهد المولد والعكس بالعكس ، و ذلك للحفاظ على الجهد الخارج ثابت (مثلا 20 ك فولت). راجع تفصيل ذلك فى الشكل 3-7 بالفصل الثالث.

2- تساوى تردد الجهد من جميع المولدات

و من المعروف أن التردد Frequency الخاص بالجهد الناتج من المولد تتحدد قيمته حسب المعادلة التالية :

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

حيث f هى التردد وp عدد الأقطاب و nهى السرعة

وهذا يعنى أنه يعتمد على عاملين أساسيين هما:

- عدد الأقطاب p
- سرعة دوران الـ rotor ، n

وبما أن عدد الأقطاب ثابت ، فبالتالي لا يمكن التحكم فى التردد إلا عن طريق التحكم فى سرعة عمود دوران المولد ، وهذا يتم من خلال الـ Governor المسئول عن التحكم فى كمية الوقود المحترق للوصول للتردد المطلوب ، وقد سبق شرح طريقة عمله.

3- تطابق الـ phase sequence فى جميع المولدات

ويسمى تعاقب الطور ، أى يجب توصيل الـPhases بالترتيب بحيث لو تخيلت أن أحد المولدين كان ترتيب الـ Phases هو R-Y-B بينما الترتيب فى المولد الثانى كان R-B-Y فهذا يعنى أن المولدين لا يمكن أن يصلا لحالة التزامن بسبب اختلاف قيمة الجهد as magnitude and angle بين وجهين two phases من الثلاثة.

4- تطابق الـ phase shift بين جميع المولدات

الشرط الرابع من شروط التزامن وهو تساوى زاوية الترحيل بين الأطوار ، أو بمعنى آخر تساوى الـ Phase angle الموجودة بين الـ Phases لجميع المولدات الموصلة على التوازى .

و يتم التأكد من جميع الشروط السابقة إما يدويا بنظام اللمبات ، أو عن طريق جهاز يسمى الـ Generator Synchronizer (شكل 1-16) ، و هو جهاز يقوم بإغلاق القاطع CB أتوماتيكيا (وبالتالي ربط المولدات معا على التوازى) فقط عند تحقق جميع الشروط السابق ذكرها .

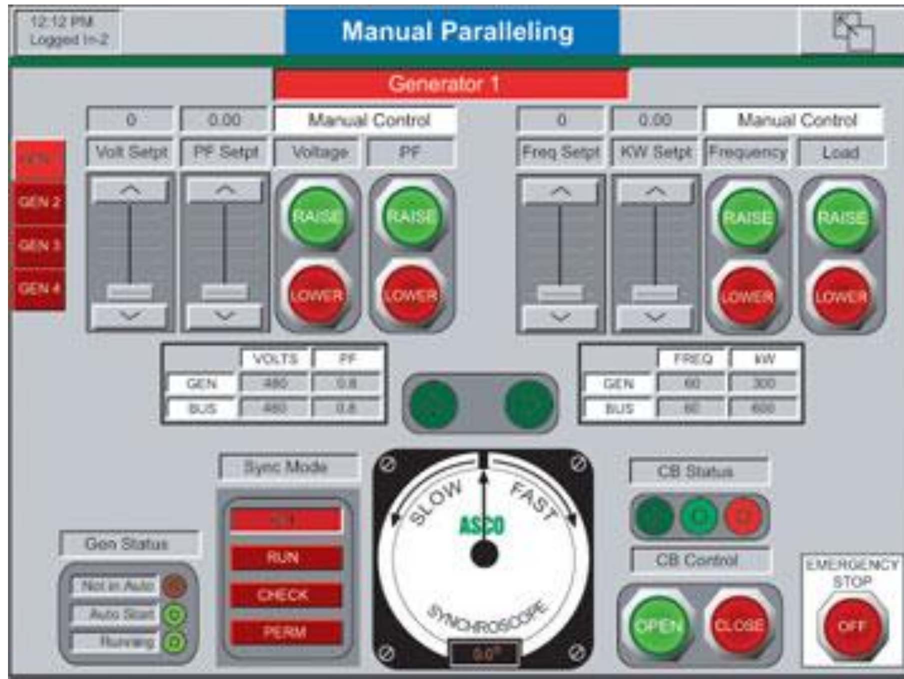


Figure 1-16 Automatic Synchronizer

1.5 خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا

الجزء التالى يشرح كيفية تحقق الشروط الأربعة السابقة عمليا:

1.5.1 الخطوة الأولي: ضبط السرعة

نقوم بتدوير التربينة والتحكم فى كمية البخار حتي تصل سرعتها إلى synchronous speed (N_s) التي تحقق تردد الشبكة والذى يتم حسابه من المعادلة

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

حيث P هو عدد الأقطاب. وبذلك يتم تحقيق الشرط الأول.

ويمكن ملاحظة ضبط السرعة من خلال الـ Synchrouscope .

1.5.2 الخطوة الثانية: ضبط الجهد

بزيادة تيار الـ DC في الـ exciter (وهو تيار المجال I_f) وبالتالي يتولد الـ flux ، $\emptyset_{rot}$ اللازم للوصول بقيمة جهد المولد للجهد المساوى للمولد الآخر إذا كان الأمر يتعلق بربط مولدين معا ، أو مساويا لجهد الشبكة إذا كان الأمر يتعلق بربط مولد بالشبكة العامة. (تذكر أن الجهد على أطراف المولد يحسب طبقا للمعادلة):

$$E_o = \frac{N_{sta}\ \Phi_{rot}\ \omega}{\sqrt{2}}$$

ومن ثم فمع تزايد I_f يصل الجهد على أطراف المولد إلى جهد يساوي جهد الشبكة . وبذلك يتم تحقيق الشرط الثاني.

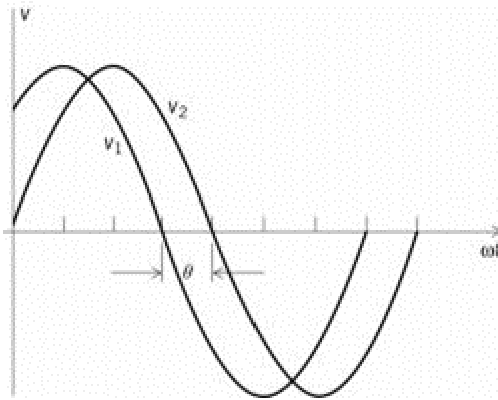
1.5.3 الخطوة الثالثة : ضبط الـ phase sequence

وهي تطابق الـ Phases للمولد بالضبط مع الشبكة (same phase sequence) وهذا الشرط يمكن التأكد من تحققه عن طريق ملاحظة اللمبات فلو كانت الـ Phases في الناحيتين غير متطابقة (كأن يتم مثلا توصيل phase a من المولد مع phase b للشبكة) فإن اللمبات لا تضئ وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت ولكن تضئ واحدة بعد الأخرى . لكن إذا تطابقت ترتيب الـ Phases فستجد اللمبات تضئ وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت (بالطبع ستكون شدة الإضاءة ضعيفة بسبب تقارب إن لم يكن تساوى جهدي المولد الأول الموجود أصلا بالخدمة والمولد الثانى المراد إدخاله للخدمة) وبذلك نكون حققنا الشرط الثالث.

1.5.4 الخطوة الرابعة : ضبط الـ phase shift

وهي أن نجعل الـ phase shift =0 ، وليس كما فى الصورة المجاورة .

وحتي نحقق ذلك لابد من جعل سرعة التربينة تساوي N_s بالضبط . وللتوضيح فإن ما يحدد هذه الزاوية هو موضع الأقطاب الـ Field Poles الخاصة بالمولد في الفراغ بالنسبة للـ Stator Phases . وعند اختلاف موضع الأقطاب في المولدين تنشأ هذه الزاوية ، وللتغلب على هذه الزاوية فإننا نزيد أو ننقص سرعة المولد لحظياً ثم نعود إلى نفس السرعة .



لاحظ أنه عند زيادة السرعة لحظيا لضبط الـ phase shift نجد أن إضاءة اللمبات تزداد وتنقص بشكل متتابع بحيث يبدو الضوء كما لو أنه يدور في اتجاه عقارب الساعة. وعندها سنجد أن اللمبات تومض مع بعضها بشكل بطيء (تتوقف سرعة الإضاءة على فرق السرعة بين المولد الأول والثانى) .

وهنا نستطيع أن نقول أن الشرط الرابع تحقق وبالتالي يمكن أن نغلق المفتاح لتوصيل المولد بالشبكة ، وبالطبع يغلق المفتاح في لحظة انطفاء اللمبات.

1.5.5 الطريقة الآلية: (Automatic method)

يُفضل دائمًا العمل بالنظام الآلى إذا لم يتوافر عمالة مدربة ، وذلك باستخدام الـ (synchronizer) وهو مسئول عن أداء جميع وظائف الرصد والمراقبة اللازمة لعملية التزامن فى المولدات الكهربية وإغلاق الـ breaker دون تدخل مهندس التشغيل ، حيث يحدد المهندس فقط القيم الأولية اللازمة لبدء عمل المولد بينما يقوم الـ (synchronizer) بقياس تردد المولد كما يقوم بالتحكم فى الـ (governor) وكذلك التحكم فى الـ (AVR) من

أجل أن يضبط قيم الجهد magnitude وقيمة زاوية الطور (phase angle) ، وعندما تكون شروط التزامن متحققة يقوم الـ (synchronizer) بغلق الـ Synchronizer switch وإتمام عملية التزامن.

ويوجد أيضا جهاز يسمى (synchro–check relay) للتأكد من استيفاء شروط التزامن جميعها وهذا زيادة فى الأمان ، ويستخدم هذا الـجهاز أيضا فى الطريقة اليدوية للأمان.

والشكل 1–17 يلخص كل ما سبق.

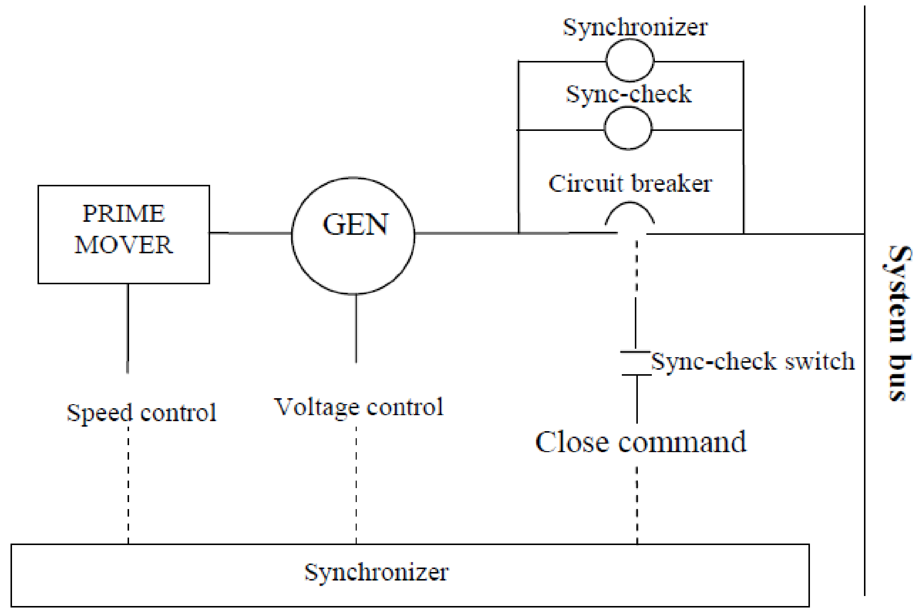


Figure 1-17 منظومة التزامن

الشكل 1–18 يوضح الزمن المتاح لعناصر المراقبة والتحكم المختلفة قبل اتخاذ أى قرار.

Generator Primary Control and AGC — **Economic Dispatch** — **Unit Commitment** — **Mid-Term Planning** — **Expansion Planning**

Seconds — **Minutes** — **Hours** — **Days** — **Weeks** — **Years**

Figure 1-18 الزمن المتاح لعناصر المراقبة والتحكم المختلفة

1.5.6 ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟

بداية تذكر أن تردد الـ induced Emf المتولدة على الـ stator winding تتناسب مع سرعة دوران الـ Rotor ، فإذا ربطنا المولد مع الشبكة بتردد مختلف عنها مثلا فإن الشبكة ستجبر المولد على ترددها ، بمعنى أنه لو

كانت سرعة تربينة المولد 2400 RPM أى ما يعادل تردد يساوى 40 Hz فإنه بمجرد الربط مع الشبكة سيرتفع تردده إلى 50 Hz وهذا يعنى أن الشبكة ستجذب المولد لترددها فيحدث تسارع مفاجئ للـ turbine shaft مما قد يؤدي إلى تدمير الـ shaft ، بالإضافة إلى أن القوة التي ستتولد على الـ shaft تعني زيادة العزم مما يعني ارتفاع مفاجئ في التيار المار في ملفات الـ stator.

أما فى حالة الربط على جهد مختلف فإن المولد – والذى يعتبر مصدرا للقدرة غير الفعالة (Reactive power) – إذا كان جهده أقل من جهد الشبكة ، فلن يستطيع إنتاج القدرة غير الفعالة اللازمة لرفع الجهد ، و بالتالى ينخفض الجهد بشكل كبير ، ويدور المولد وكأنه موتور وليس مولد. كما سيمر تيار Circulating current بين المولدات مما يؤدى الى احتمالية احتراق أحد المولدات أو جميعها.

وهذا كله يمثل خطرا أكيدا على المولد ، ومن هنا جاءت أهمية عملية التزامن.

1.6 توزيع القدرة بين المولدات فى الشبكة LOAD SHARING

ونقصد به التقسيم النسبي للـ KW و KVAR الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال بين العديد من المولدات المتصلة على التوازي ، وهذا التقسيم ضروري لتجنب مشاكل over loading و مشاكل الـ stability في منظومة التوليد.
بداية ، فإن الشبكة الكهربية Grid يمكن أن تعرف بأنها . infinite Bus Bar, BB وهذا يعني أنها تشبه محطة كبيرة جدا ولن يؤثر دخول أو خروج حمل ما (سواء كان هذا الحمل P or Q) على قيمة الجهد أو التردد الخاص بها كما فى 1-19. والخط الأحمر فى الشكل يمثل العلاقة بين الجهد والـ Q أو العلاقة بين التردد والـ P فى هذه الشبكة العامة.

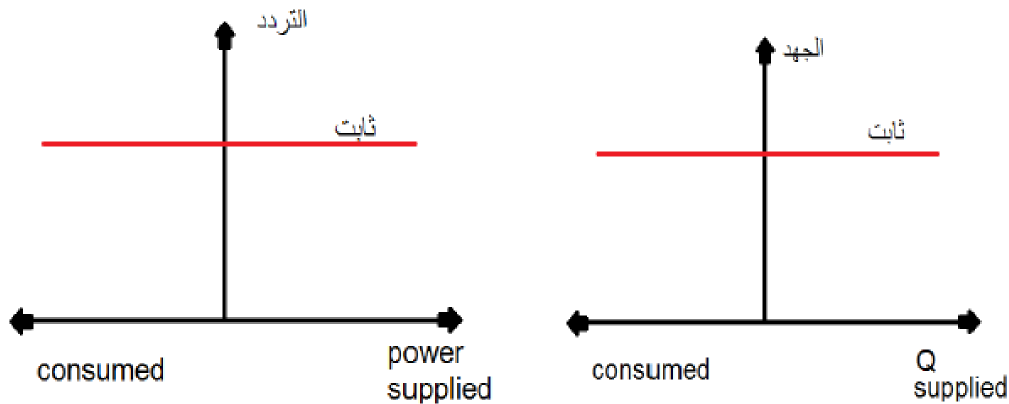


Figure 1-19 الجهد والتردد فى الشبكة العامة

أما العلاقة بين الجهد والـ Q أو العلاقة بين التردد والـ P فى المولدات المنفردة فلا يمكن تمثيلها بخط مستقيم أفقى كما فى الشكل السابق بل تمثل بعلاقة عكسية (الخط الأخضر فى الأشكال التالية) ، وهذا يعنى انخفاض التردد مع زيادة التحميل وانخفاض الجهد مع زيادة سحب الـ Q فى المولدات المنفردة والتى سنحاول توصيلها على الشبكة العامة لتشارك فى تغذية الأحمال كما سنرى.

وينقسم توزيع الأحمال أو الـ load sharing إلى نوعين :-

1- Active power (KW) load sharing

2- Reactive power (KVAR) load sharing

1.6.1 توزيع القدرة الفعالة بين المولدات

يتم ذلك بضبط Governer الخاص بوحدة التوليد المتصلة بالشبكة العامة لتغيير الـ no-load Frequency ، fn.l وذلك للتحكم في كمية Power ، P-G التي يشارك بها مولد معين متصل على الشبكة العامة في تغذية الحمل الإجمالي P_{load} (اللون البنى فى شكل 1-20) علما بأن علاقة القدرة والتردد للشبكة العامة تمثل بالخط الأحمر كما ذكرنا سابقا بينما علاقة القدرة والتردد فى المولد تمثل بالخط الأخضر.

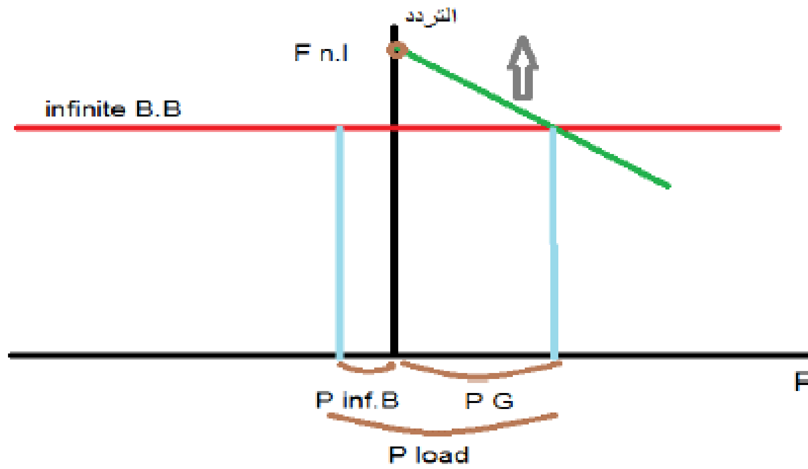


Figure 1-20 ربط مولد منفرد مع شبكة

فعند رفع قيمة Governer set point for Fn.l تزداد قيمة الـ Power المسحوبة من ذلك المولد وتقل قيمة الـPower المسحوبة من الشبكة العامة (تعرف الشبكة العامة بأنها الشبكة متناهية القدرة ثابتة الجهد ، فمهما أخذت منها لا يتغير ترددها ولذا تسمى Infinite Bus Bar لأن ترددها دائما ثابت).

أما عند إنزالـ قيمة Governer set point for Fn.l فستقل قيمة الـ Power المسحوبة (شكل 1−21) من ذلك المولد وستزيد قيمة الـ Power من الشبكة لأن الحمل ثابت.

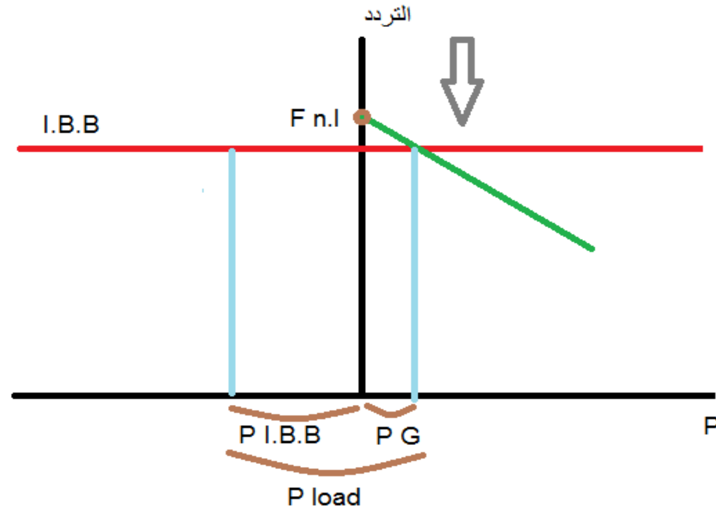


Figure 1-21 تحميل خفيف على المولد المنفرد

أما عند رفع Governer set point for Fn.l بصورة كبيرة (شكل 1−22) فيمكن حينئذ تغذية الحمل بالكامل من المولد فقط بل ربما تزيد القدرة المسحوبة من المولد عن حاجة الحمل فيصبح المولد وكأنه يشارك أيضا فى التغذية العمومية للشبكة ولكن عمليا يتم فصل المولد عن الشبكة في هذه الحالة.

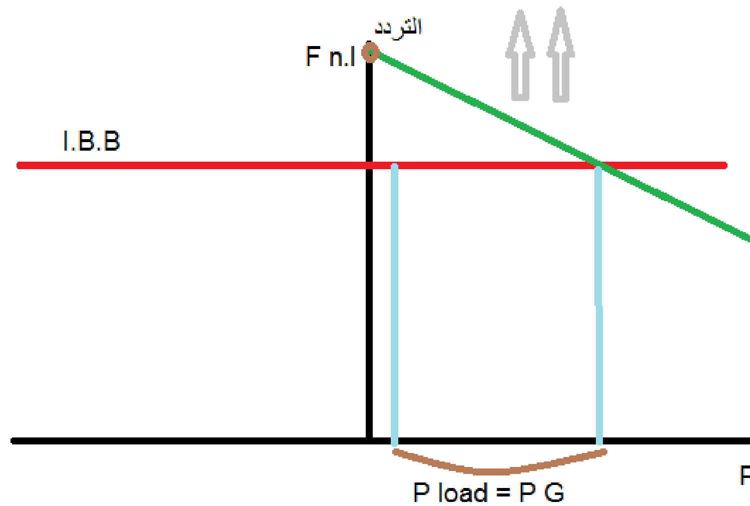


Figure 1-22 تحميل زائد على المولد المنفرد

أيضا عند إنزال Governor set point for Fn.I بصورة كبيرة (شكل 1−23) فإن القدرة التى يشارك بها المولد P G ستكون أقل من الصفر في تلك الحالة وسيسحب power من الشبكة وسيعمل كموتور ولكن في هذه الحالة سيفصل reverse power relay المولد.

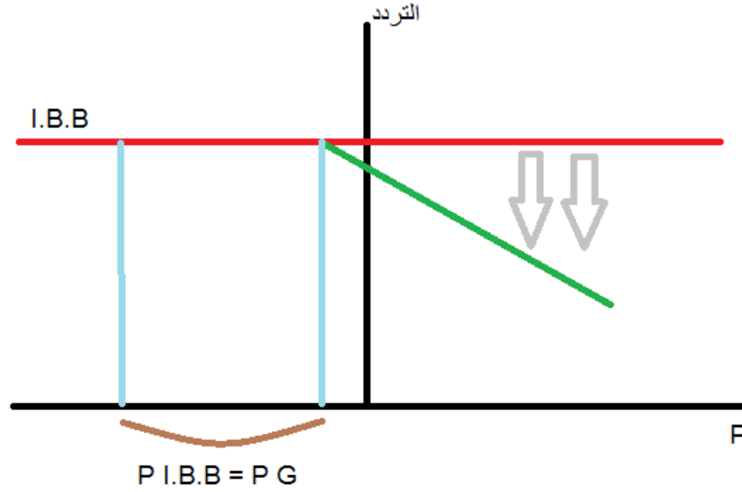


Figure 1-23 المولد يعمل كموتور

1.6.2 توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات

عندما يتصل أكثر من مولد معا على التوازي ، فإننا يمكننا التحكم في مقدار Reactive Power KVAR الخارجة من كل مولد عن طريق Field Excitation System .

فعند زيادة field excitation المتولدة فإن ذلك يؤدي إلى زيادة (KVAR) المتولدة من هذا المولد (Over Excitation) ولكن سوف يؤدي إلى تقليل power factors لأن الـ Active power ستنخفض طبقا للـ D− curve الذى يمثل العلاقة بين الـ P and Q فى المولدات المتزامنة ويظهر فى الشكل 1−24.

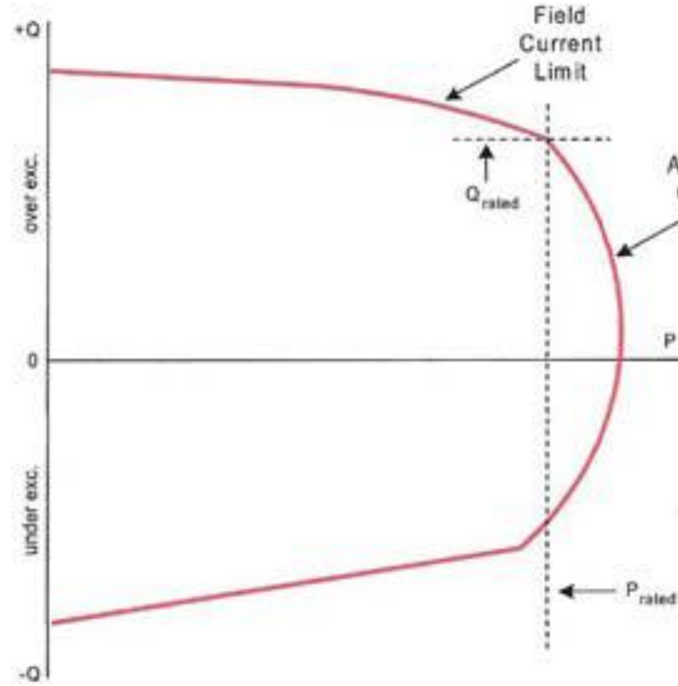


Figure 1-24 P-Q relation in D Curve

علما بأنه لن تؤثر زيادة field excitation على جهد الشبكة لأن جهد الشبكة ثابت. والعكس بالعكس.

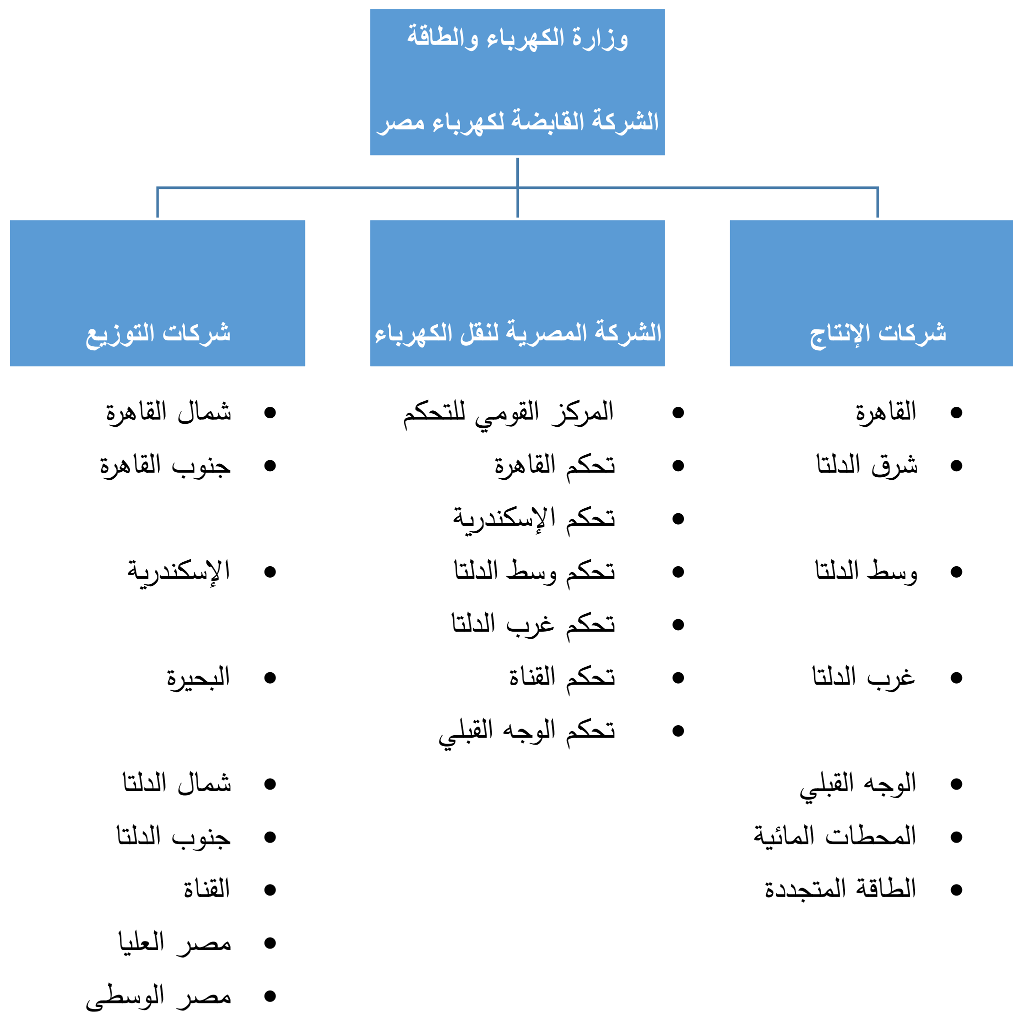
ملحوظة:

استخدام معوضات القدرة غير الفعالة سيحسن بشكل كبير المنحنى السابق حيث يمكن الحصول على قدر أكبر من الـ Q دون حدوث تغييرات كبيرة فى الـ P. وسيدرس ذلك تفصيليا فى الباب الثانى من هذا الكتاب.

ملحق-1:
معلومات إضافية عن الشبكة المصرية

منظومة الكهرباء فى مصر

تتكون منظومة الكهرباء فى مصر من ست شركات لإنتاج الكهرباء وشركة واحدة لنقل الطاقة وتسع شركات لتوزيع الكهرباء كما فى المخطط التالي. وجميعهم يتبعون الشركة القابضة لكهرباء مصر التى تتولى مسئولية توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربية.



ويقوم المركز القومي للتحكم في الطاقة (ومقره مدينة سقيل التابعة للوراق – بالجيزة) بالإضافة إلى ستة مراكز تحكم إقليمية (شكل 1–25) (تحكم القاهرة - تحكم الإسكندرية - تحكم وسط الدلتا – تحكم غرب الدلتا - تحكم القناة – تحكم الوجه القبلي) بدور أساسي فى التحكم فى الطاقة الكهربية من لحظة توليدها وحتى تصل إلى مستهلكيها آخذا في الاعتبار أمان واستمرارية واقتصاديات التشغيل.

فالمستوى الأول من التحكم فى الطاقة هو الخاص بمركز التحكم القومى ، وهو المركز الوحيد الذى يمكنه المراقبة و التحكم فى محطات التوليد بالإضافة للتحكم فى محطات التحويل الموجودة على شبكة الـ 500kV ، أو الموجودة على شبكة الـ 220kV.

أما المستوى الثانى من التحكم فيشمل مراكز التحكم الإقليمية ، وهذه لها القدرة على المراقبة والتحكم فى فصل وتشغيل المحطات جهد 66kV أو أقل ، لكن لا يمكن لهذه المراكز الأقليمية فصل أو تشغيل أى محطة فى شبكة الـ 500kV أو شبكة الـ 220kV.

ثم المستوى الثالث ويشتمل على مراكز تحكم فى شبكات التوزيع بالمدن. و تتبع مراكز التحكم الأقليمية السبعة السابقة.

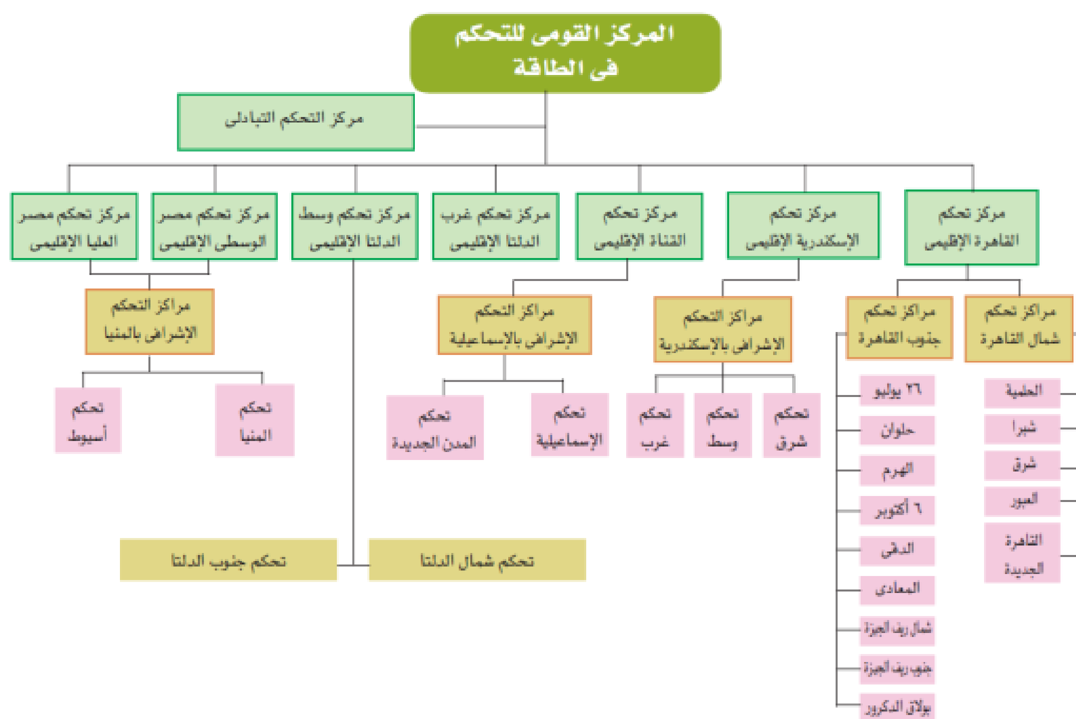


Figure 1-25 مراكز التحكم فى مصر

تطور الحمل الكهربي على الشبكة :

لا يسير الطلب على الكهرباء بمعدل ثابت يومياً أو أسبوعياً أو شهرياً أو فصلياً ، فالطلب على الكهرباء يتأثر بنوع الأحمال ، من حيث كونه صناعياً أو زراعياً أو تجارياً أو منزلياً ، كما يتأثر بالأحوال الجوية و درجات الحرارة صيفاً و شتاءً ، و يتأثر بالمناسبات المختلفة كالأجازات و الأعياد ، و بالمواسم كشهر رمضان مثلاً ، كما يتأثر باختلاف الوقت على مدى اليوم ليلاً و نهاراً .

و يعد الحمل الأقصى في السنة أحد المؤشرات الهامة لتطور استهلاك الكهرباء ، و يجب أن تكون منظومة الكهرباء مصممة للإستجابة لذروة الأحمال .

ملحوظة :

يعتبر الرقم الممثل لنصيب الفرد من الطاقة الكهربية أحد مقاييس ارتفاع مستوى المعيشة فى البلاد ، ويساوى هذا الرقم فى مصر تقريبا 1830kWH للفرد سنويا (إجمالى الطاقة المولدة فى 2014 = 164836جيجا وات ساعة فإذا قسمنا هذا الرقم على 90 مليون فرد = 1830kWH) . وهذا أقل من المعدل العالمى الذى يبلغ 2800 ك وات ساعة للفرد.

والجدول 1-3 يعطى إحصائية من البنك الدولى بمتوسط استهلاك الكهرباء فى بعض الدول.

Table 1-3

البلد	2011	2012
إثيوبيا	56	57
أذربيجان	1,705	2,053
أرمينيا	1,752	1,832
أروبا		
إريتريا	60	62
إسبانيا	5,599	5,573
أستراليا	10,712	10,398
إستونيا	6,314	6,689
إسرائيل	6,930	7,189
أفغانستان		
إكوادور	1,219	1,282
الأرجنتين	2,901	2,955
الأردن	2,289	2,357
الإمارات العربية المتحدة	10,537	10,463
ألبانيا	2,195	2,118
البحرين	17,093	17,395
البرازيل	2,394	2,462
البرتغال	4,848	4,736

جمهورية كوريا الديمقراطية الشعبية	657	654
جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية		
جمهورية مصر العربية	1,701	1,700
جمهورية مقدونيا يوغوسلافية السابقة	3,895	3,690
جنوب أفريقيا	4,606	4,405

تطور نمو الطلب فى مصر

يمكن تقسيم النمو في الحمل الأقصى فى مصر (وبالتالي نمو القدرة الكهربية المركبة) إلى ثلاث مراحل:

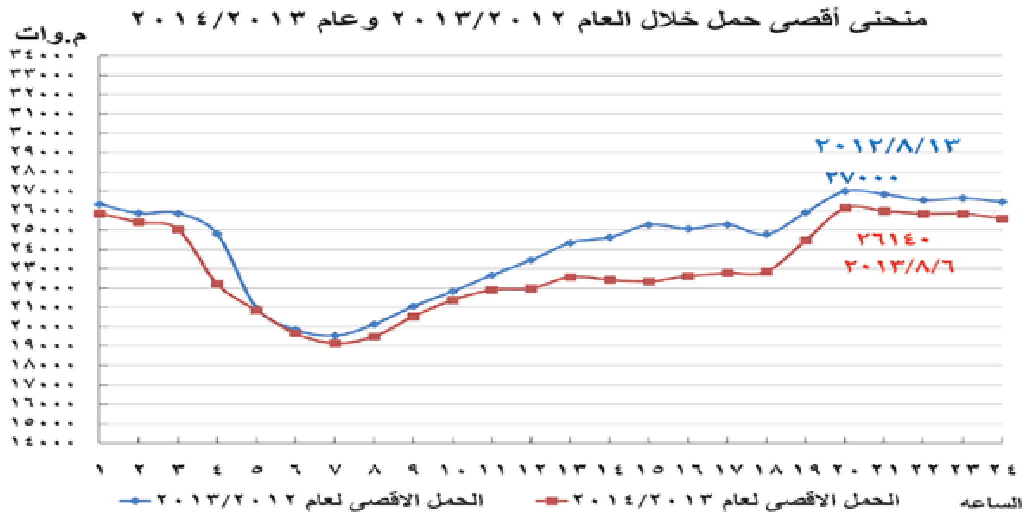
المرحلة الأولى 1952 – 1970 : حيث بلغ معدل الزيادة السنوية في الحمل الأقصى في بدايات هذه المرحلة حوالي 12 ، 3% .

المرحلة الثانية 1970 – 1985 : لم يزد معدل زيادة الحمل الأقصى في الفترة بين (1970–1971)–(1973–1974) عن 4 ، 4% سنوياً بسبب ظروف الحرب ، إلا أنه في العقد الثاني (1974–1985) زاد الحمل الأقصى أكثر من ثلاث مرات بمعدل زيادة قدره 12 ، 5% سنوياً ، و قد اقترن ذلك بفترة النمو غير العادي في التوليد الكهربي ، و الذي اقترن بالنمو غير العادي في إنتاج البترول و الغاز الطبيعي و اعتمد عليه اعتماداً شبه مطلق و قد بلغ معدل الزيادة في الحمل الأقصى طوال المرحلة الثانية حوالي 11 ، 4% سنوياً .

المرحلة الثالثة 1985 – حتى الآن : استمر فيها تزايد الحمل الأقصى وأن كان بمعدلات أقل بكثير من المرحلة السابقة حيث ارتفع الحمل الأقصى من 5361 ميجاوات عام 1985–1986 إلى 9850 ميجاوات عام 1997–1998 ، بمعدل زيادة قدره 5 ، 2% سنوياً ، واستمرت معدلات الزيادة حتى وصل إلى ما يقرب من 30000 ميجاوات فى 2015.

و قد حدث في هذه المرحلة تغيير دراماتيكي وتاريخي في نمط الأحمال عما كان في المرحلتين السابقتين ، فقد كان الحمل الأقصى دائماً يحدث في الشتاء فى فترة ماقبل الثمانينيات نظراً لطول ساعات الليل وما يتبع ذلك من استخدام أكبر للإنارة سواء في المنازل أو الشوارع أو المحلات التجارية أو المصانع...إلخ ، ولكن منذ أوائل الثمانينيات ومع تزايد تركيب أجهزة التكييف فى المنازل أصبح الحمل الأقصى يحدث صيفا وتزايد بمعدلات عالية حتى وصل كما ذكرنا إلى ما يقرب من 30000 ميجا وات فى 2015.

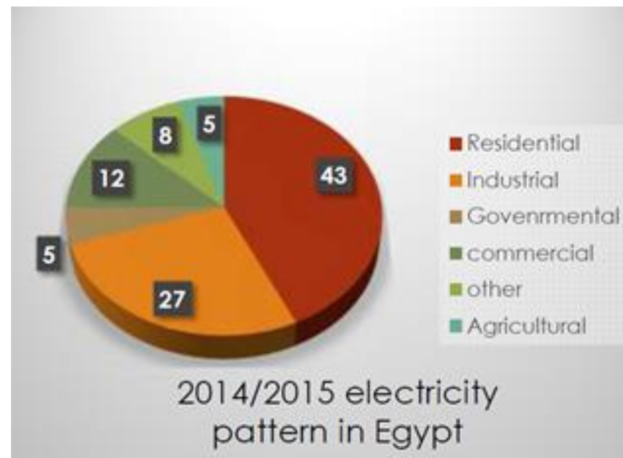
وكان أقصى حمل للشبكة فى مصر هو 28750 ميجاوات.(2015) . والشكل 1–26 يوضح توزيع الأحمال على ساعات اليوم . واضح أن الحمل الأقصى فى حدود التاسعة مساء ، وبالطبع هذا التوقيت يختلف من دولة لأخرى حسب الظروف المناخية ، فالكويت مثلا يحدث فيها الحمل الأقصى فى الفترة من 2 ظهرا إلى السادسة مساء حيث تصل درجة الحرارة صيفا إلى فوق الخمسين درجة مئوية.



منحنى الحمل اليومى فى اليوم الذى حدث فيه أقصى تحميل (سنة 2012 و 2013)   Figure 1-26

ملحوظات:

1- نمط توزيع الأحمال يعطى تصورا للأنشطة الاقتصادية بالدولة ، ففى معظم دول العالم المتقدم تكون الأحمال الصناعية فيها أكبر من السكنية ، لكن للأسف لدينا فى مصر 43% أحمال سكنية مقارنة بحوالي 27% أحمال صناعية (والباقى تجارية وخدمات عامة كما فى الشكل 1-27).



نمط توزيع الأحمال فى مصر   Figure 1-27

2- إذا استمر نمو الأحمال بهذا المعدل فلن يكون هناك حل سوى إنشاء محطات نووية مع التوسع في استخدامات الطاقة الجديدة و المتجددة لسد العجز فى الكهرباء ، فالطاقة النووية هى الوحيدة القادرة على الإنتاج الكثيف بكميات محدودة من الوقود (الوقود النووى هنا) ، فالطاقة

المحررة من كيلو جرام واحد من الفحم يمكن أن تنتج 8 كيلو واط ساعة ، أما الطاقة الناتجة من كيلو جرام واحد من اليورانيوم 235 ، فيمكن أن تنتج ما يقارب 24 مليون كيلو واط ساعة.

3- لابد أن نأخذ فى الاعتبار أن هناك احتمالا كبيرا لحدوث فقر مائى فى مصر (سواء بسبب سد النهضة الأثيوبى أو بسبب الزيادة السكنية) وهذا قد يستلزم اللجوء لتحلية ماء البحر ، وبالطبع هذه العملية ستستهلك طاقة كهربية إضافية وحمل كهربى جديد لم يكن يوما فى الحسبان ، فتحلية المتر المكعب من الماء تحتاج لحوالى 4 kWH ، وهذا يعنى أن تحلية 40 بليون متر مكعب من الماء (النقص المتوقع حتى 2030) يحتاج لطاقة كهربية تعادل تقريبا كل الطاقة الكهربية المتاحة الآن فى مصر !!!!. بمعنى آخر أن من يفكر فى تحلية الماء عليه أولا أن يضاعف الطاقة الكهربية المنتجة .

محطات التوليد المتصلة بالشبكة الموحدة المصرية

جميع محطات التوليد فى مصر بمختلف أنواعها (مائية ، بخارية ، هوائية إلخ) مرتبطة بالشبكة الموحدة ونسب مشاركة كل نوع يظهر فى الجدول 1-4:

Table 1-4 تنوع مصادر الطاقة فى مصر

البيان	%إجمالي الطاقة الكهربية المنتجة
الطاقة المائية	7.94
طاقة الرياح	0.79
الطاقة الشمسية	0.07
كهرباء مولدة من المحطات الحرارية المربوطة بالشبكة	91.02
كهرباء مولدة من المحطات الغير مربوطة بالشبكة	0.14
كهرباء مشتراة من فائض الشركات الصناعية	0.04

وهذه نبذة عن بعض أهم المحطات المستخدمة في توليد الكهرباء في مصر

1- محطة كهرباء السد العالي 12x175 MW

- تعتبر محطة كهرباء السد العالي واحدة من أكبر محطات التوليد الكهرومائية في العالم.
- تشمل المحطة 12 وحدة قدرة كل منها 175 MW.

2- **محطة الكريمات** : هناك أربع محطات فى منطقة الكريمات :

- **محطة الكريمات** : وهي تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية ، قدرة كل واحدة 627 ميجاوات بإجمالى قدرة 1254 ميجاوات ، والوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.
- **محطة الكريمات المركبة 1** : و تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميجاوات ، بإجمالى قدرة 750 ميجاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار.
- **محطة الكريمات المركبة 2** : وهي تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل واحدة 250 ميجاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميجاوات بإجمالى قدرة 750 ميجاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار.
- **محطة الكريمات الشمسية** : وفيها 20 ميجاوات هو قدرة الجزء المعتمد على الطاقة الشمسية فى التسخين ، إلى جانب 120 ميجاوات هي قدرة الجزء الحراري العادى .

3- **محطة مرسي مطروح البخارية** : و تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية قدرة كل منهما 30 ميجاوات ، بإجمالى قدرة 60 ميجاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.

4- **محطة كفر الدوار البخارية** : وهي تحتوي على عدد 4 وحدة بخارية ، قدرة كل منهما 110 ميجاوات ، بإجمالى قدرة 440 ميجاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.

5- **محطة كهرباء النوبارية** : هناك منطقتان لتوليد الكهرباء في النوبارية. هما :

- **النوبارية المركبة (1و2)** : وهي تحتوي على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما (عدد 4 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بنظام الدورة المركبة بقدرة 250 ميجاوات) بإجمالى قدرة مركبة 1500 ميجاوات ، و الوقود المســـتخدم غاز طبيعي وسولار.
- **النوبارية المركبة 3** : وهي تشتمل على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما (عدد 1 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بقدرة 250 ميجاوات بنظام الدورة المركبة) بإجمالى قدرة مركبة 750 ميجاوات ، و الوقود المســـتخدم هو غاز طبيعي و سولار

6- **محطة الزعفرانة** : تشتمل المحطة على عدد 105 تربينة هوائية (شكل 1-28) ، قدرة كل واحدة 0.6 ميجاوات ، إلى جانب عدد 117 تربينة هوائية قدرة كل منهما 0.66 ميجاوات ، إلى جانب عدد 478 تربينة هوائية قدرة كل منهما 0.85 ميجاوات ، بإجمالى قدرة 547 ميجاوات.

المحطات المائية فى مصر

1- محطة كهرباء السد العالي

يُمثل توليد الكهرباء من السد العالي فى مصر حوالي من 6 ٪ من إجمالى الطاقة بمصر ، وكان هذا الرقم منذ سنوات يصل إلى 40% لكن مع التوسع فى بناء المحطات الغازية والبخارية انخفضت النسبة.

- تعتبر محطة كهرباء السد العالي (شكل 1-28) واحدة من أكبر محطات التوليد الكهرومائية في العالم.
- تشمل المحطة 12 وحدة قدرة كلها منها 175 MW ، وجهد التوليد هو 15.75kV ، ويتم نقل الطاقة الكهربية المولدة من وحداتها إلى مراكز الأحمال على خطوط جهد 500 kV و 220 kV.



Figure 1-28 السد العالى فى مصر

- أقصى طاقة مولدة سنوياً 10000 مليون ك.و.س.
- السد العالي عبارة عن سد ركامي طوله عند القمة 3830 مترا منها 520 مترا بين ضفتي النيل ويمتد الباقي على هيئة جناحين على جانبي النهر ، ويبلغ ارتفاع السد 111 مترا فوق منسوب قاع نهر النيل وعرضه عند القمة 40 مترا.

2- محطة كهرباء أسوان الأولي

- بدأ العمل في مشروع محطة كهرباء أسوان الأولى عام 1956 .
- تشتمل المحطة على سبع وحدات بقوة 46 ميجاوات لكل وحدة والتي انخفضت إلى 40 ميجاوات بعد بناء السد العالي .

- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1750 مليون ك.و.س.

3- محطة كهرباء أسوان الثانية 4 x 67.5 ميجاوات

- المحطة تضم 4 وحدات بقدرة 67.5 ميجاوات لكل وحدة.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1800 مليون ك.و.س.

4- محطة كهرباء إسنا

- هي أول محطة كهرباء مائية أنشئت شمال مدينة أسوان لاستغلال مساقط النيل عند إسنا ، و ذلك ضمن مشروع قناطر إسنا الجديدة.
- تضم المحطة 6 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 14.28 ميجا وات ، و قدرة إجمالى ة 85.68 ميجاوات ، و قد بدأت وحداتها في الدخول على الشبكة الموحدة في يوليه عام 1993 م.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 643 مليون ك.و.س.

5- محطة كهرباء نجع حمادي

- تضم المحطة 4 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 16 ميجاوات.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 470 مليون ك.و.س.

6- محطة كهرباء أسيوط

محطة توليد كهرباء مائية عند قناطر أسيوط ، و تم افتتاحها فى 2013.

والجدول 1-5 يبين أسماء وقدرات كل محطات التوليد فى مصر.

محطات التوليد فى مصر وقدراتها التفصيلية Table 1-5

شركات الانتاج	اسم المحطة		بيان الوحدات	إجمالي القدرة الاسمية م.و	نوع الوقود المستخدم	تاريخ التشغيل التجارى
القاهرة	شبـرا الخيمـة	(ب)	٣١٥×٤	١٢٦٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٨٨-٨٥-٨٤
	شبـرا الخيمـة	(غ)	٣٥×١	٣٥	غاز طبيعى – سولار	١٩٨٦
	توسيع غـرب [1]	(ب)	٣٥٠×٢ + ٣٣٠×٢	١٣٦٠	مازوت – غاز طبيعى	٢٠١١ – ١٩٩٥
	جنوب القاهرة المركبة ١		٦٠×٢+١١٠×٣	٤٥٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٨٩-١٩٦٥
	جنوب القاهرة المركبة ٢		٥٥×١+١١٠×١	١٦٥	غـاز طبيعـى	١٩٩٥
	شمال القاهرة المركبة		٢٥٠×٢+٢٥٠×٤	١٥٠٠	غازطبيعى-سولار	٢٠٠٨-٢٠٠٦/٢٠٠٥-٢٠٠٤
	التبين	(ب)	٣٥٠×٢	٧٠٠	مازوت – غاز طبيعى	٢٠١٠
	وادى حـوف	(غ)	٣٣,٣×٣	١٠٠	غاز طبيعى – سولار	١٩٨٥
	٦ اكتوبر [2]	(غ)	١٥٠×٤	٦٠٠	غاز طبيعى- سولار	٢٠١٢
	دمياط المركبـة		١٣٦×٣+ ١٣٢×٦	١٢٠٠	غاز طبيعى – سولار	١٩٩٣ – ١٩٨٩
	عتـاقـة	(ب)	٣٠٠×٢+١٥٠×٢	٩٠٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٨٧-٨٦-٨٥
شرق الدلتا	ابـوسلطـان	(ب)	١٥٠×٤	٦٠٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٨٦-٨٤-٨٣
	الشبـاب	(غ)	٣٣,٥×٣	١٠٠,٥	غاز طبيعى - سولار	١٩٨٢
	الشباب الغازية الجديدة	(غ)	١٢٥×٨	١٠٠٠	غاز طبيعى- سولار	٢٠١١
	دمياط الغازية الجديدة	(غ)	١٢٥×٤	٥٠٠	غاز طبيعى- سولار	٢٠١١
	غرب دمياط [3]	(غ)	١٢٥×٤	٥٠٠	غاز طبيعى- سولار	٢٠١٢
	بور سعيد [4]	(غ)	٢٣,٩٦×٢	٤٨	غاز طبيعى – سولار	١٩٧٧
	العـريـش	(ب)	٣٣×٢	٦٦	مازوت- غاز طبيعى	١٩٩٦-٩٥
	عيون موسـى	(ب)	٣٢٠×٢	٦٤٠	مازوت – غاز طبيعى	٢٠٠١
	شرم الشيخ [5]	(غ)	٢٤,٢٧×٤ + ٢٣,٧×١ +٥,٨×٤ + ٥×٢	١٥٤	سولار	١٩٩٧-٧٩-٧٥
	الغردقة	(غ)	٢٤,٢×٦	١٤٣	سولار	١٩٧٩-١٩٧٧
	الزعفـرانة(رياح)		٠,٦٦×١١٧+٠,٦×١٠٥ + ٠,٨٥×٤٧٨	٥٤٧	رياح	٢٠١٠- ٢٠٠٩-٢٠٠٨-٢٠٠٧
	قطاع خاص					
	خليج السويس	(ب)	٣٤١,٢٥×٢	٦٨٢,٥	مازوت – غاز طبيعى	٢٠٠٢
	شرق بورسعيد	(ب)	٣٤١,٢٥×٢	٦٨٢,٥	مازوت – غاز طبيعى	٢٠٠٣
وسط الدلتا	طلخـا المركبـة		٤٥,٩٤×٢+٢٤,٧٢×٨	٢٩٠	غاز طبيعى – سولار	١٩٨٩-٨٠-٧٩
	طلخـا ٢١٠ توسيع	(ب)	٢١٠×٢	٤٢٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٩٥-١٩٩٣
	طلخـا ٧٥٠ المركبـة		٢٥٠×١ + ٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى – سولار	٢٠١٠-٢٠٠٦
	النوبارية المركبة ٢,١		٢٥٠×٢ + ٢٥٠×٤	١٥٠٠	غاز طبيعى – سولار	٢٠٠٦-٢٠٠٥
	النوبارية المركبة٣		٢٥٠×١+٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى – سولار	٢٠١٠- ٢٠٠٩
	المحمودية المركبـة		٥٨,٦٧ ×٢+٢٥×٨	٣١٦	غاز طبيعى – سولار	١٩٩٥-١٩٨٣
	العطف المركبة		٢٥٠×١+٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى – سولار	٢٠١٠- ٢٠٠٩
	كفـر الـدوار	(ب)	١١٠×٤	٤٤٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٨٦-٨٤-٨٠
	دمنهـور توسيع	(ب)	٣٠٠×١	٣٠٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٩١
	دمنهـور	(ب)	٦٥×٣	١٩٥	مازوت – غاز طبيعى	١٩٦٩-٦٨
	دمنهـور المركبـة		٥٨×١+٢٥×٤	١٥٨	غاز طبيعى – سولار	١٩٩٥-١٩٨٥
غرب الدلتا	السيـوف	(غ)	٣٣,٣×٦	٢٠٠	غاز طبيعى – سولار	١٩٨٤-٨٣-٨٢-٨١
	كـرموز	(غ)	١١,٦٨×١ + ١١,٣٧×١	٢٣,٠٥	سـولار	١٩٨٠
	ابـوقيـر	(ب)	٣١١×١+١٥٠×٤	٩١١	مازوت – غاز طبيعى	١٩٩١-٨٤-٨٣
	ابـوقيـر	(غ)	٢٤,٢٧×١	٢٤	غاز طبيعى – سولار	١٩٨٣
	ابـوقيـر الجديدة [6]	(ب)	٦٥٠×٢	١٣٠٠	غاز طبيعى – مازوت	٢٠١٣-٢٠١٢
	سيـدى كرير ١ ،٢	(ب)	٣٢٠×٢	٦٤٠	مازوت – غاز طبيعى	٢٠٠٠-١٩٩٩
	سيدى كرير المركبه	(ب)	٢٥٠×١+٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى- سولار	٢٠١٠
	مطروح	(ب)	٣٠×٢	٦٠	مازوت – غاز طبيعى	١٩٩٠
	قطاع خاص					
	سيدى كرير ٤،٣	(ب)	٣٤١,٢٥×٢	٦٨٢,٥	مازوت- غاز طبيعى	٢٠٠١
الوجه القبلى	الوليديـة	(ب)	٣١٢×٢	٦٢٤	مـازوت	١٩٩٧-١٩٩٢
	الكريمـات	(ب)	٦٢٧×٢	١٢٥٤	مازوت – غاز طبيعى	١٩٩٨-١٩٩٧
	الكريمـات المركبه (١)		٢٥٠×١+٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى - سولار	٢٠٠٩-٢٠٠٧
	الكريمـات المركبه (٢)		٢٥٠×١+٢٥٠×٢	٧٥٠	غاز طبيعى - سولار	٢٠١١-٢٠٠٩
	اسيـوط	(ب)	٣٠×٣	٩٠	مـازوت	١٩٦٧-١٩٦٦
	الكريمات الشمسية/ الحرارية		٢٠×١ + ٥٠×١ + ٧٠×١	١٤٠	شمس- غاز طبيعى	٢٠١١
المحطات المائية	السد العالى		١٧٥×١٢	٢١٠٠	مائى	١٩٦٧
	خـزان اسوان (١)		٤٠×٧	٢٨٠	مائى	١٩٦٠
	خـزان اسوان (٢)		٦٧,٥×٤	٢٧٠	مائى	١٩٨٦-١٩٨٥
	اسنـا		١٤,٢٨×٦	٨٦	مائى	١٩٩٣
	نجع حمادى		١٦×٤	٦٤	مائى	٢٠٠٨

2
محطات التوليد الحرارية

هناك أربعة أنواع رئيسية لهذه المحطات :

1. البخارية
2. الغازية البسيطة
3. محطات الغازية المركبة
4. محطات الديزل

وفى مصر يمكن اعتبار النوع الأول (البخارية) هو الأهم والأضخم ضمن منظومة التوليد ، أما الغازية بنوعيها (بسيطة ومركبة) فهى الأكثر انتشارا ، (عدد المحطات البخارية : 17 ، الغازية المركبة : 14 ، الغازية البسيطة : 17) ، بالإضافة إلى المحطات الصغيرة الموجودة على شبكات التوزيع جهد 22 و 11 ك ف لضبط الجهود.

و المحطة البخارية تتداخل فيها مكونات تنتمى لثلاثة أقسام (ميكانيكى وكيميائى وكهربى) .

وهذا الفصل مقسم إلى جزئين:

- الجزء الأول ، وفيه ندرس بالتفصيل المحطات البخارية (القسمين الميكانيكى والكيميائى فقط).
- الجزء الثانى ، يخصص للأنواع الثلاثة الباقية من أنواع المحطات الحرارية (الغازية و الدورة المركبة ومحطات الديزل).

أما القسم الكهربى فى المحطات الكهربية عموما فنخصص له الفصل التالى مباشرة (الثالث).

علما بأنه يمكن تصنيف المحطات النووية على أنها محطات بخارية ، ولكن حيث أن مصدر الحرارة فيها مختلف تماما عن الأنواع السابقة لذا سنفرد لها فصلا خاصا وهو الفصل الرابع.

الجزء الأول من الفصل الثانى

محطات التوليد البخارية

تسمى هذه المحطات بمحطات توربينات البخار لاعتمادها على ضغط البخار لتحريك التوربينات.
وتستعمل هذه المحطات أنواعا مختلفة من الوقود حسب الأنواع المتوفرة ، مثل الفحم الحجري أو البترول السائل أو الغاز الطبيعي أو الصناعي .
تمتاز المحطات البخارية بكبر مساحتها وكبر حجم إنتاجها (يمكن أن تتعدى الوحدة الواحدة 600 ميجا وات) ، وتتميز أيضا برخص تكاليفها بالنسبة لإمكاناتها الضخمة ، وعمرها الافتراضى الكبير ، كما تمتاز بإمكانية استعمالها لتحلية المياه المالحة ، الأمر الذي يجعلها ثنائية الإنتاج خاصة في البلاد التي تقل فيها مصادر المياه العذبة.

وأبرز عيوبها أن تكلفة الإنشاء عالية ، وأنها تحتاج لمساحة كبيرة ، إضافة إلى بطء دخولها على الشبكة (5-7 ساعات) .

2.1 أساسيات المحطات البخارية

تعتمد محطات التوليد البخارية على استعمال نوع الوقود المتوفر وحرقه في أفران خاصة لتحويل الطاقة الكيميائية في الوقود إلى طاقة حرارية في اللهب الناتج من عملية الاحتراق ، ثم استعمال الطاقة الحرارية في تسخين المياه في غلايات خاصة (BOILERS) لتحويل الماء المقطر إلى بخار في درجة حرارة وضغط مرتفعين (تصل درجة الحرارة إلى 540 درجة وقيمة الضغط 160 بار) ، ثم يتم تسليط هذا البخار على ريش توربينات بخارية صممت لهذه الغاية ، فيقوم البخار المندفع بتدوير محور التوربينات ، وبذلك تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية على محور هذه التوربينات .

يرتبط عمود المولد الكهربي ربطا مباشرا مع عمود التوربينات البخارية فيدور الجزء الدوار فى المولد الذى يسمى بالـ Rotor – وهو الذى يحمل منظومة المجال المغناطيسي للمولد – Electric field بنفس سرعة دوران التربينة ، فيقطع هذا المجال ملفات الجزء الثابت (STATOR) ، وبذلك تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية .

لا يوجد فوارق أساسية بين محطات التوليد البخارية التي تستعمل أنواعا مختلفة من الوقود إلا من حيث طرق نقل وتخزين وتداول وحرق الوقود . وقد كان استعمال الفحم الحجري شائعا في أواخر القرن الماضي وأوائل هذا القرن ، ولايزال الفحم يستخدم عالمياً على نطاق واسع في توليد الكهرباء ، ففي بريطانيا يسهم الفحم بأكثر من الثلث في توليد الطاقة الكهربائية ، وتبلغ هذه النسبة نحو 50% في الولايات المتحدة ، 59% في الهند ، ونحو 78 % في الصين . مع ملاحظة أن السبب فى ارتفاع نسبة استخدام الفحم فى هذه الدول تحديدا أن لديها احتياطيات ضخمة جدا من الفحم.

إلا أن اكتشاف واستخراج البترول ومنتجاته أحدث تغييرا جذريا في محطات التوليد الحرارية ، حيث أصبح يستعمل بنسبة تسعين بالمائة لسهولة نقله وتخزينه وحرقه سواء كان بصورة وقود سائل أو غازي.

ملحوظة:

توجد مشكلتان أساسيتان لاستخدام الفحم فى مصر .

- أولا أن الفحم حتى الآن لا يمثل أكثر من 1٪ من إجمالى مصادر الطاقة فى مصر (مصدره الأساسى فى مصر من منجم المغارة بسيناء).
- ثانيا. الفحم كمصدر للوقود هو من أكثر المصادر تلويثا للبيئة وهي في مصر ملوثة بشكل لا يحتمل المزيد ، فإنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها إنبعاث 1041 طن من CO_2.

2.2 الدورة البخارية

يمكن أولا متابعة هذه الدورة بصورة مبسطة من خلال الشكل 2-1 . وكما هو واضح فى الشكل ، فإن مصدر الطاقة الأساسية فى هذا المثال تحديدا هو الفحم ، الذى يحترق بالغلاية لإنتاج الحرارة المستخدمة فى إنتاج البخار الذى يندفع لتدوير التربينة ، التى تتصل بالمولد كما ذكرنا سابقا. ويظهر بالشكل بعض المكونات المساعدة لإتمام هذه الدورة مثل المكثف الذى يدخل عليه البخار الخارج من التربينة فيتكثف ويتحول لماء مرة أخرى لبدء دورة جديدة. كما يظهر برج التبريد الذى يستخدم فى عملية التكثيف السابقة.

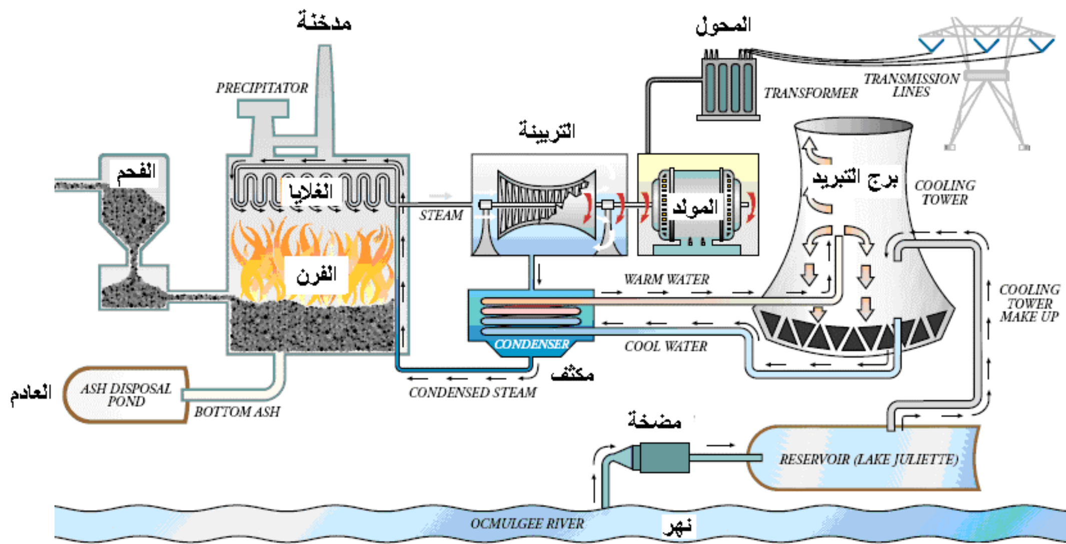


Figure 2-1 مكونات محطة توليد بخارية تعمل بالفحم

أما الدورة التفصيلية فنعرضها لاحقا بعد شرح مكونات المحطة.

2.2.1 اختيار مواقع المحطات البخارية

يتحكم في اختيار المواقع المناسبة لمحطات التوليد الحرارية عدة عوامل مؤثرة نذكر منها:

1. القرب من مصادر الوقود وسهولة نقله إلى هذه المواقع وتوفر وسائل النقل الاقتصادية .
2. القرب من مصادر مياه التبريد لأن المكثف يحتاج إلى كميات كبيرة من مياه التبريد . لذلك تبنى هذه المحطات عادة على شواطئ البحار أو بالقرب من الأنهار .
3. القِرب من مراكز استهلاك الطاقة الكهربية لتوفير تكاليف إنشاء خطوط النقل . ومراكز الاستهلاك هي عادة المدن والمناطق السكنية والمجمعات التجارية والصناعية.

2.2.2 كفاءة المحطات البخارية

العيب الرئيسى لهذه المحطات هو انخفاض كفاءتها ، ويمكن توقع أو استنتاج ذلك بطريقتين:
الأولى من خلال دراسة مخطط المحطة والتى يلخصها الشكل 2-2 ، ومنه يتضح حجم الطاقة المفقودة سواء فى الهواء الساخن الناتج عن حرق الوقود ، أو خلال المكثفات التى تسترجع البخار لحالته السائلة تمهيدا لإعادة الدورة من جديد.

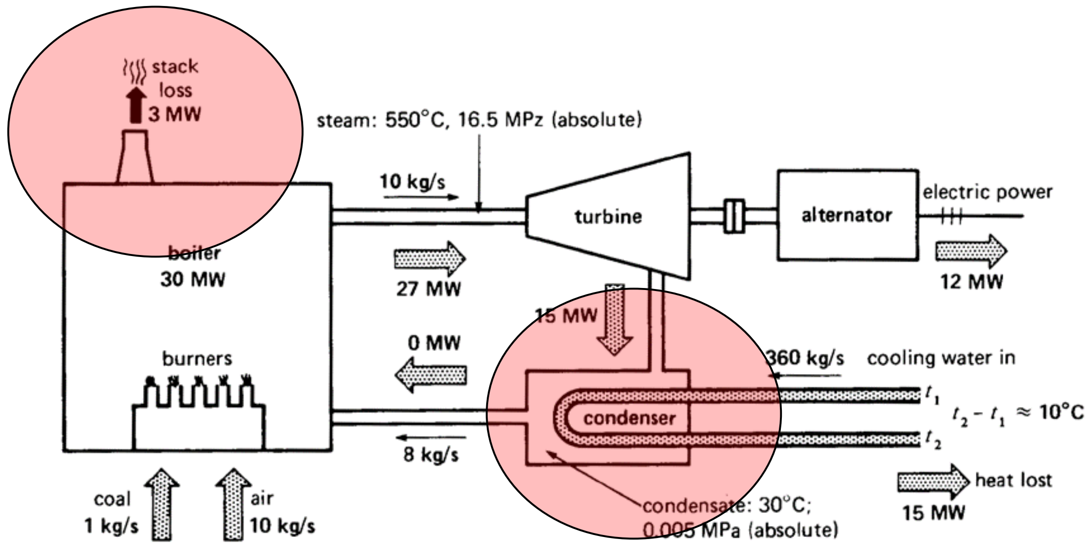


Figure 2-2 أسباب انخفاض كفاءة محطات التوليد البخارية

السبب الثانى يرجع لطبيعة الآلات الحرارية ، حيث نستنتج منه أن الكفاءة الحرارية للمحطة تساوى :

$$\eta = (1 - \frac{T_2}{T_1}) \times 100$$

حيث T_1 درجة حرارة البخار الداخل وT_2 درجة حرارة البخار الخارج (كلاهما بمقياس كلفن) ، وحيث أنه حرارة الغازات الخارجة لا يمكن أن تكون أقل من حرارة الهواء الخارجى (لاعتبارات تخص القانون الثانى للديناميكا

الحرارية) ، وحرارة الغازات الداخلة لا يمكن أن تتجاوز 550 درجة مئوية لاعتبارات تصنيعية ، فبالتعويض فى المعادلة السابقة نجد أن أعلى كفاءة نظرية لا تتجاوز 64%.

- $T_2 = 20+273 = 293$ K
- $T_1 = 550 + 273 = 823$ K
- Efficiency = $((1-293/823)*100 = 64.4$ %

2.2.3 الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية

تعتمد فكرة توليد الكهرباء في المحطات البخارية على التكامل بين أقسام المحطة الأساسية:

1. القسم الكيميائي المسئول أساسا عن تجهيز ومراقبة منظومة المياه المستخدمة فى الدورة البخارية.
2. القسم الميكانيكي المسئول عن تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية بتدوير التربينة التى ستقوم بتدوير المولد.
3. القسم الكهربي المسئول عن تحويل الطاقة الميكانيكية (الحركية) إلى طاقة كهربية.

فيما يلى نشرح بالتفصيل مهمات القسمين الكيميائى والميكانيكى فى المحطات البخارية. أما الجزء الكهربى فيدرس لاحقا بالتفصيل فى الفصل التالى.

القسم الكيميائي فى المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو إمداد جميع مرافق المحطة وبالأخص الغلاية بالماء النقي الذي تصل درجة نقائه إلى 99.5% بحيث يكون هذا الماء خاليا تماماً من الشوائب والأملاح حتى لا يؤثر على كفاءة الغلاية والتربينة ، لأن هذه الشوائب تؤدي إلى تآكل (نحر) ريش التربينة مما يؤدى إلى انخفاض العمر الافتراضي لريش التربينة ، ومن ثم تقليل الكفاءة العامة للمحطة.

وتتضح أهمية هذا القسم في مشكلة محطة توليد معروفة بمصر والتي تسبب ارتفاع نسبة الأملاح والشوائب في البخار في إخراج وحدة توليد كاملة منها بعد سنة واحدة من بداية تشغيل المحطة.

وهذا القسم فى دول الخليج يكتسب أهمية خاصة لأنه ليس فقط مسئولا عن توفير المياه المقطرة للمحطة ولكنه أيضا مسئولا عن إنتاج مياه عذبة للشرب ، ففى دول الخليج لا يوجد أنهار ، والمصدر الوحيد لمياه الشرب هو تقطير مياه الخليج العربى بواسطة وحدات التقطير distillation units ، ولعلك لا تستغرب إذا علمت أن ثلث الطاقة الكهربية المولدة هناك فى محطات الكهرباء تستهلك مرة أخرى داخل المحطة لإنتاج مياه عذبة بالتقطير (وزارة الكهرباء هناك تسمى دائما وزارة الكهرباء والماء ، وأعتقد الآن أن السبب صار واضحا لهذه التسمية)

ملحوظة: وحدة قياس كمية الماء المنتجة هى مليون جالون امبراطورى MIG (Million Imperial Gallons) ويساوى تقريبا أربعة ونصف لتر.

2.2.4 نظرية عمل القسم الكيميائي:

يتم سحب الماء من النهر بواسطة طلمبات سحب المياه ، وبالطبع فهذه المياه تحتوي على كميات هائلة من الشوائب التي تتمثل في الأغصان والأسماك والطمي والأملاح ، فيتم التخلص أولا من الأغصان والأسماك عن طريق بعض الشبكات المعدنية ثم يتم التخلص من الطمي عن طريق المرشحات ، أما المشكلة الكبرى فتتمثل في الأملاح التي تنقسم إلى جزئين (أملاح ذائبة و أملاح غير ذائبة).

فأما الأملاح الذائبة فيتم التخلص منها عن طريق إضافة بعض المكونات الكيميائية لتحويلها إلى أملاح غير ذائبة وهى التي يتم التخلص منها بعد ذلك عن طريق المرشحات Filters الكيميائية .

وأما الشوائب غير الذائبة فهي غالبا تكون عبارة عن أكاسيد المعادن الناتجة عن تآكل المواد المصنوع منها المكثف و مواسير التغذية.

2.2.5 تحسين معامل الـــ PH للماء

وتتم معالجة مياه التغذية عن طريق إضافة مادة قلوية للماء (غالبا النشادر NH_4) لجعل الـ PH للمياه يساوى تقريبا (9.2→9) ، و عندها يقل معدل التآكل ، وبالتالي تقل الشوائب. وتعتبر النشادر أكثر القلويات استخداما في هذه العملية نظرا لقلة تكلفتها ولاستقرارها عند درجات الحرارة المرتفعة. حيث تتفاعل الأمونيا مع الأكسجين و تمنع تكون أكاسيد المعادن و بالتالي يقل معدل التآكل.



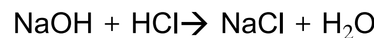
$$NH_4 + O_2 \rightarrow NO + H_2O$$

وتتم معالجة مياه الغلاية لزيادة كفاءة التوربينات والغلايات وذلك بمنع تآكل التوربينات أو تكون القشور على الأسطح الناقلة للحرارة. وتتم معالجة المياه عن طريق التحكم في الـ PH الخاص بمياه الغلاية باستخدام مركب ثلاثي فوسفات الصوديوم Na_3PO_4 الذى يتفاعل مع الماء و ينتج القلويات التي تساعد على تقليل معدل التآكل.



$$Na_3PO_4 + H2O \rightarrow Na_2HPO_4 + NaOH$$

وبالتالي إذا تكونت الأحماض في المياه فسوف يتم معادلتها عن طريق هيدروكسيد الصوديوم



$$NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$$

2.2.6 ما هو الرقم الهيدروجينى PH ؟

هو بالانجليزية (power of hydrogen or pH) وهي المقياس الذي يحدد ما إذا كان السائل حمضا أم قاعدة أم متعادلا.

- فتعتبر السوائل التى لها درجة حموضة أقل من 7 أحماضا مثل عصير اليمون(2.4) ، الكولا (2.5) ، الخل (2.9) ، الحليب(6.5) . لاحظ حامضية الحليب مرتفعة ، لذا فالشخص الذى يعانى من حموضة فى المعدة ينصح بعدم تناول الحليب .
- وتعتبر السوائل التى لها درجة حموضة أعلى من 7 محلولا قلويا أو قواعد. مثل ماء البحر (7.7) وصابون اليد (9) .
- أما درجة الحموضة 7 فهي تعتبر متعادلة ، وهي تساوي حموضة الماء النقي عند درجة حرارة 25 مئوية.

2.2.7 إختبارات القسم الكيميائى

بعد ذلك يتم إجراء بعض الاختبارات على الماء للتأكد من درجة نقاءه وهي:

1- إختبار التوصيلية:

حيث أن الماء يعتمد في درجة توصيليته على نسبة الأملاح و المعادن الموجودة به ، ولذلك فالتوصيلية العالية تعنى وجود نسبة أملاح ومعادن عالية ، والتوصيلية المنخفضة تعنى قلة نسبة هذه الأملاح والمعادن.

2- إختبار الحامضية:

ومن خلاله يتم اختبار درجة الحامضية والقلوية للماء.

ثانيا: القسم الميكانيكي فى المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو تحويل الطاقة الحرارية الكامنة في البخار إلى طاقة حركية . وتتحول هذه الطاقة الحركية بعد ذلك إلى طاقة كهربية ، وسندرس ذلك فى الفصل الثالث.

ملحوظة هامة جدا: الأرقام الواردة فى شرح الأجزاء التالية مأخوذة من محطات حقيقية ، وهى بمثابة مثال فقط وليس بالضرورة أن تكون كل المحطات لها نفس القيم ، فأرجو ملاحظة ذلك.

والمكونات الأساسية للقسم الميكانيكي تشمل :

- الغلاية بملاحقاتها
- التربينة البخارية بملحقاتها
- المكثف ومساعدات المحطة

وسنبدأ بعرض العناصر الأساسية يليها الملحقات المتصلة بها.

2.3 **الغلاية** (BOILER)

الغلاية عبارة عن مبنى معزول حرارياً يتكون من عدة (ثلاث) طوابق كما فى الشكل 2-3 وهو أكبر مبنى بالمحطة ، ويتميز بوجود مداخن عالية لخروج عوادم الاحتراق . وتعمل الغلاية على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

و يختلف شكل الغلاية باختلاف الوقود المستخدم ، و يكون البخار الناتج عند درجة 540 درجة مئوية تقريبا و يكون ضغطه فى حدود 160 بار . تعمل على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

ولكل وحدة توليد غلاية خاصة بها ، وبالتالي يمكنك معرفة عدد وحدات التوليد بأى محطة من عدد المداخن العالية بها (شكل 2-9 كما سيأتى لاحقا).

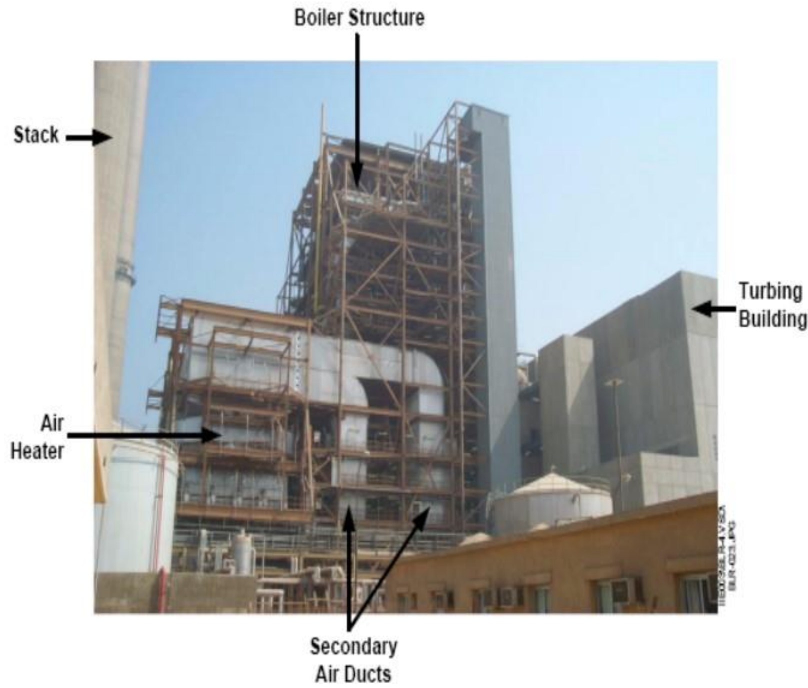


Figure 2-3 مبنى الغلاية

وتتكون الغلاية أساسا من عدد من المهمات نوجزها فيما يلى:

2.3.1 الفرن (Furnace)

كل غلاية تحتوي على فرن متعدد الوقود يتم تشغيله إما بالمازوت أو بالغاز الطبيعي.

- درجة حرارة الفرن تصل إلى 1500 درجة مئوية.
- الفرن يحتوي على عدد من الحارقات يصل فى بعض المحطات إلى 18 حارق مثبتين في جدار الفرن ومقسمين إلى ثلاث مجموعات كل مجموعة في طابق.
- كل حارق يحتوي على أداة إشعال تستخدم لبدء تشغيل الفرن وتستخدم أداة الإشعال السولار كوقود لبدء التشغيل.
- كل وحدة تحتوي على مروحتين Draft Fans وهما المسئولتان عن إمداد عملية الاحتراق بما تحتاجه من هواء مضغوط.

- لابد للمحطة من الاحتفاظ بكمية كبيرة من الوقود مخزنة فى خزانات كما فى الشكل 2–4. وتكون مواصفات خط تغذية المحطة بالغاز الطبيعى فى حدود قطر 30 بوصة وضغط الغاز 20 بار . وفى الغالب سيكون هناك خط أو خطين آخرين لتوصيل النوع الثانى من الوقود (مازوت مثلا) .



Figure 2-4 مخازن الوقود

2.3.2 الدرم (Drum)

وهو عبارة عن وعاء أسطواني ضخم كما فى الشكل 2–5 يتم من خلاله فصل قطرات الماء عن البخار عن طريق إمراره على ألواح مائلة ، ويحتوى الدرم على ست فتحات سفلية من خلالها يتم سحب المياه إلى أنابيب على جدار الفرن والتي تكون مرتبة بحيث تغطى معظم الجدار الداخلي للفرن.



Figure 2-5 Drum

كما توجد أربعة صمامات للأمان تفتح في حالة زيادة الضغط داخل الدرم كما توجد في الدرم فتحة دخول للصيانة (man-hole).

2.3.3 الموفّر (Economizer)

الغازات والعادم التي تنتج من الاحتراق داخل الغلاية تكون درجة حرارتها عالية فيقوم الموفّر باستخدام هذه الغازات في تسخين المياه تسخيناً مبدئياً قبل دخولها إلى الغلاية حتى نقلل من كمية الوقود المستهلكة داخل الغلاية. ويظهر الـــ Drum and Economizer فى الشكل 2-6.

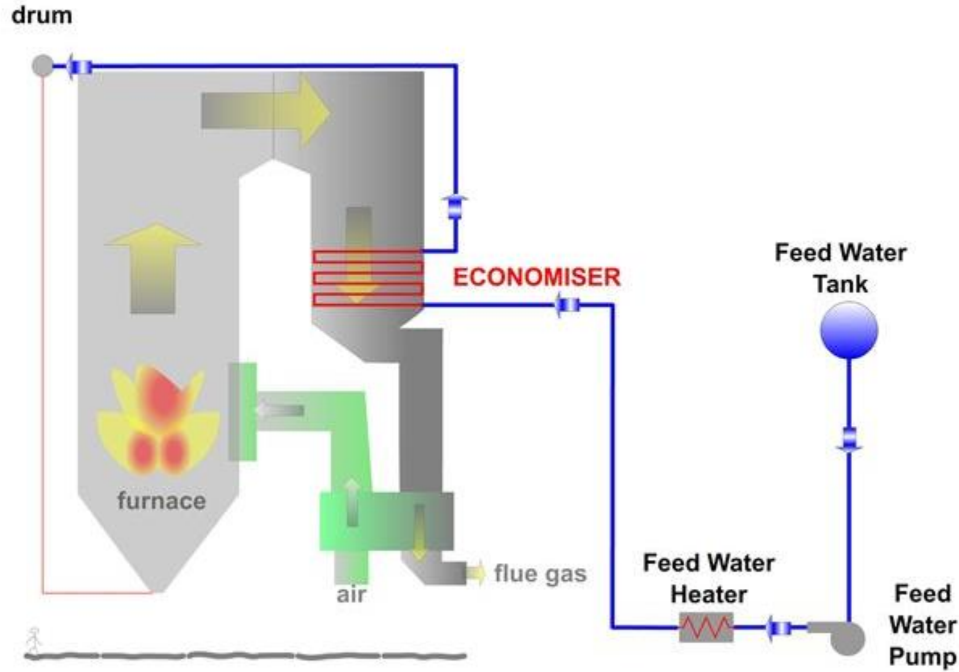


Figure 2-6 مخطط للغلاية والعناصر المرتبطة بها

2.3.4 المسخنات (Heaters)

يوجد لدينا نوعان من الـ Heaters ، يمكن من الدورة البخارية الكاملة المرسومة فى الشكل 2−7 تمييزهما:

1− (Low Pressure Heaters) ، وهي ضمن مجموعة المسخنات المبدئية للماء قبل دخولها إلى الغلاية وتستخدم في عملية تسخين الماء عن طريق استغلال حرارة البخار المستنزف (exhausted steam) وهو البخار الذى خرج من تربينة الضغط المنخفض ولايزال يحتفظ ببعض الحرارة ، فنستفيد من هذه الحرارة فى تسخين الماء قبل مروره على الـ (deaerator) كما فى الشكل 2−7 .

2− (High Pressure Re−Heaters) ، وهذه يتم من خلالها يتم تسخين الماء عن طريق البخار المستنزف من تربينة الضغط المنخفض وتربينة الضغط العالي .

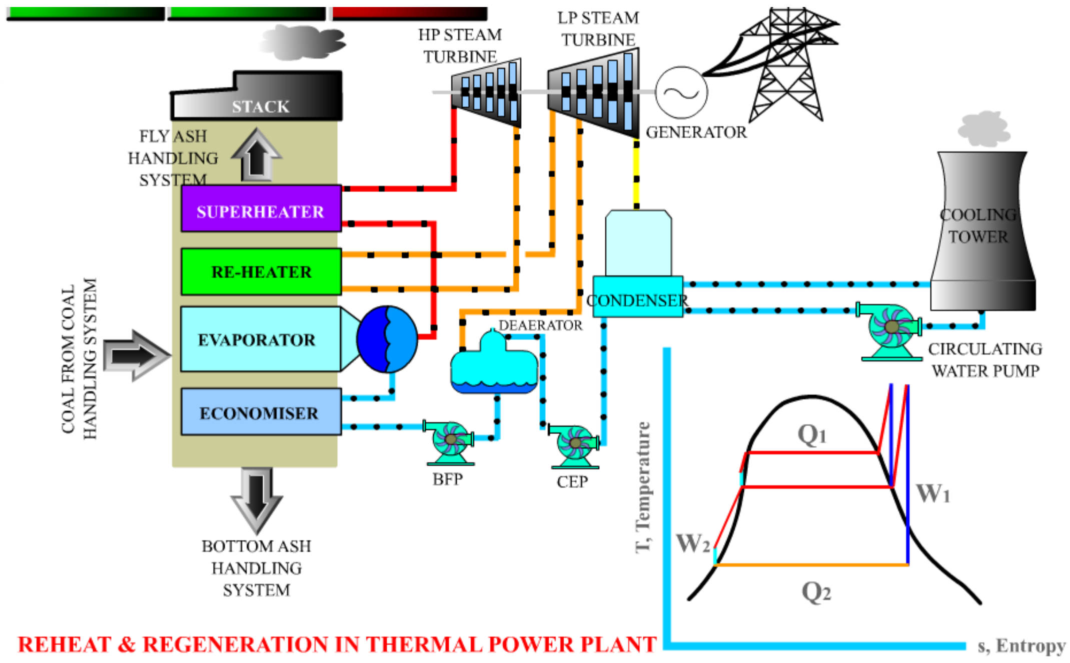


Figure 2-7 الدورة البخارية بالتفصيل

2.3.5 وظيفة الـــ Dearator

الدور الأساسي لـ Dearator (شكل 2-8 ، هو نزع الأكسجين و ثانى أكسيد الكربون وغيرهما من الغازات الأخرى التى قد تكون مذابة فى الماء الداخل على الغلاية والذى يمكن ن يسبب حدوث عمليات الصدأ فى المكونات المعدنية. حيث يخفض نسبة الأكسجين إلى حوالي 7ppm .



Figure 2-8 Dearator

2.3.6 المدخنة Chimney

تكون المدخنة اسطوانية الشكل مصنوعة من الطوب الحرارى ومرتفعة جدا كى تعمل على طرد الدخان و الأبخرة السامة إلى الهواء على ارتفاع عالي بعيدا عن العمال و البيئة المحيطة بالمحطة . ونظرا لخروج العادم من الغلاية عند درجة حرارة عالية تصل إلى 390 درجة مئوية مما يؤدي إلى زيادة التلوث الجوي

بالإضافة إلى كونه عادما يحتوي على كميات هائلة من غاز أول أكسيد الكربون ، فإننا نلجأ إلى إمرار العادم على Air Pre–heater حيث يستفاد من درجة الحرارة العالية في تسخين الهواء قبل دخوله للغلاية كما ذكرنا حين الحديث عن الموفر Economizer ، وبعد ذلك نمرر العادم النهائي على مرشحات Filters لاستخلاص الغازات الضارة منه قبل الخروج من المدخنة ذات الارتفاع الشاهق. ودرجة حرارة العادم فى النهاية تخرج عند درجة لا تتعدى 100 درجة مئوية ، وإلا فإن الوحدة يمكن أن تخرج بسبب ارتفاع حرارة العادم.

والشكل 2–9 لمداخن محطة شبرا الخيمة ، التى يراها كل من يمر بطريق اسكندرية الزراعى. (أربع وحدات قدرة كل منها 315 ميجا وات)



Figure 2-9 مداخن محطة شبرا الخيمة بمصر

2.3.7 الآلات والمعدات المساعدة فى المحطة

وهذه عبارة عن عدد كبير من المضخات و الأجهزة الميكانيكية مثل أجهزة قياس الضغط ، و درجة الحرارة في كل مرحلة و بعض الأجهزة الكهربية مثل أجهزة قياس فرق الجهد ، وأجهزة قياس التيار ، وقياس القدرة وغيرها.

وهناك عدة أنواع من مضخات المياه بالمحطات فمنها المضخات التى تقوم برفع ضغط الماء إلى قيمة عالية ليتم تسخينه تحت الضغط المرتفع ويتحول إلى بخار محمّص ، ومنها مضخات سحب الماء من البحر/النهر ، إلخ . ومنها طلمبات التغذية Feeding Pumps التى تعمل على ضغط 180–225 بار ، وهذا الضغط يمكن المياه من الوصول للغلاية. وغالبا تكون 3 طلمبات اثنان منهم يعملان بالبخار والثالثة تعمل بالكهرباء كاحتياطى.

2.4 التربينة (TURBINE)

هى الجزء المسئول عن دوران عمود المولد عن طريق تمدد البخار المحمّص الذى يدخل لتدوير التربينة على ضغط عالي وحرارة عالية. وتتكون من عدد من الريش كما فى الشكل 2-10 تتحرك بشكل دائري حول محورها و موصلة ميكانيكيا بالمولد حيث يدور المولد بنفس سرعة التربينة ، لذلك يجب أن تدور التربينة بسرعة ثابتة حتى يظل التردد ثابت على المولد . ويتم التحكم فى ذلك عن طريق الـ Governor الذي سبق الحديث عنه .

وهذه نموذج لمواصفات احدى التربينات بقدرة 150 ميجاوات:

RATED OUTPUT===➔	*150000 KW*
STEAM PRESSURE➔	*88 BAR*
STEAM TEMPERATUER=>	*799*
RATED SPEED====➔	*3000 rpm*
MANUFACTURED IN 1975 TOKYO JAPAN	

والتربينة مقسمة إلى ثلاثة أقسام:

- تربينة الضغط العالي .
- تربينة الضغط المتوسط.
- تربينة الضغط المنخفض.

وكل قسم فى التربينة يكون عبارة عن عدة دوائر عليها زعانف كما فى الصورة ، و يدخل البخار المرحلة الأولى بضغط 160 بار ، ودرجة حرارة 540 مئوية ، ويخرج البخار بعد المرحلة الأولى إلى الغلاية مرة أخرى ليكتسب مزيدا من الطاقة ، ثم يعود ليدخل المرحلة الثانية على ضغط 40 بار ونفس درجة الحرارة. ويدخل على التربينة ما يقرب من 800 طن بخار بالساعة.

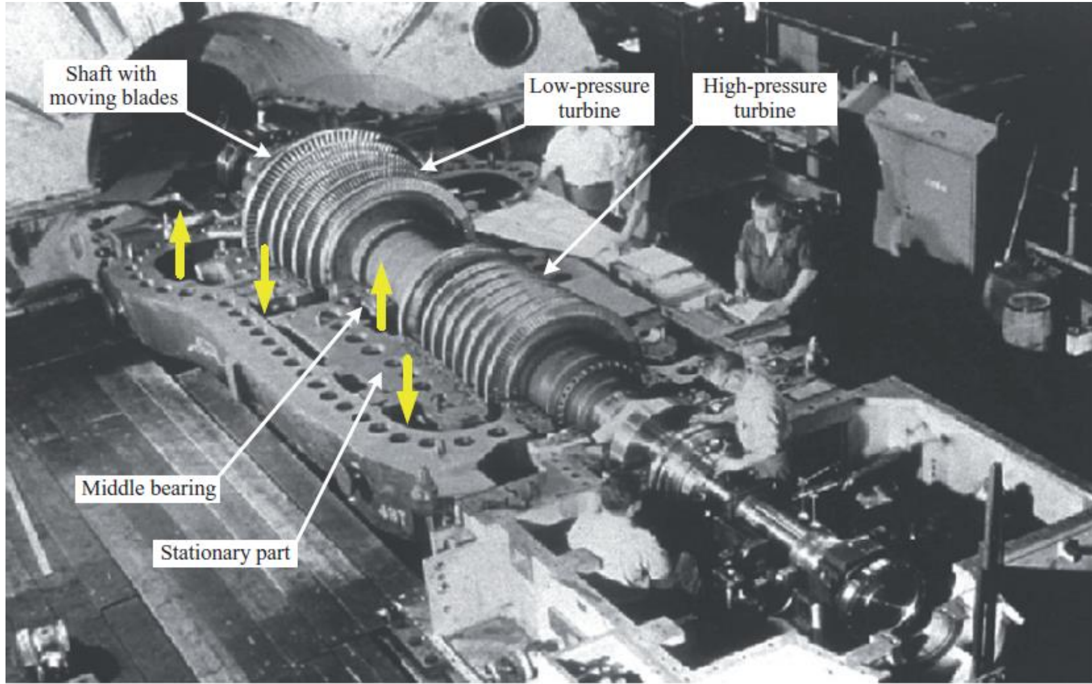


Figure 2-10 التربينة البخارية

2.4.1 نظام التزييت فى التربينة

يوجد خلوص (فراغ) بين التربينة وجسمها ، ويتم ملأ ذلك الفراغ بالزيت لمنع الاحتكاك وتجنب الحرارة العالية ، والمساعدة على تبريد هذه الأجزاء وكذلك تساعد على سهولة حركة عمود التربينة .
ويوجد نظام خاص بالتزييت يتكون من خزان زيت يحتوى بداخله على الزيت ، ومضخات رئيسية مركبة على عمود التربينة وتعمل على سحب الزيت من الخزان ودفعه إلى أماكن معينة بالتربينة ، كما يوجد أيضا مضخات مساعدة تستخدم في بداية التشغيل ويوجد أيضا مضخة الطوارئ التي تعمل عند انقطاع التيار الكهربي عن الوحدة حيث تقوم بسحب الزيت من الخزان وتدفعه إلى مجمع الزيت بعد مروره بمبردات الزيت.

وهذا النظام يعتبر من الأنظمة الحرجة فى المحطة ، وحدوث أى مشكلة فيه تؤدى إلى توقف الوحدة تماما.

2.4.2 عملية تدوير التربينة

يجب بقاء عمود إدارة التوربين مستقيما خلال فترات توقف الوحدة عن العمل ، والسبب في ذلك أنه عند إيقاف عمود دوران التربينة نجد أن النصف السفلى من العمود يبرد بمعدل أسرع من النصف العلوي وهذا يؤدى إلى حدوث إلتواء أو إنحناء في عمود دوران التربينة ، ولذلك يتم دوران عمود التربينة ببطء حتى تتساوى درجة الحرارة على جميع نقاط العمود من أعلى ومن أسفل.

2.5 المكثف (CONDENSER)

وهو المسئول عن تكثيف البخار الخارج من التربينة قبل أن يضخ مجددا للغلاية حيث أنها تقوم بخفض ضغطه ودرجة حرارته عن طريق مياه تبريد تسحب من النهر / الخليج.

وفكرة عمل المكثف (شكل 2–11) هو أنه يأخذ المياه الباردة من المحيط أو البحر أو النهر ويمر البخار المراد تكثيفه فى مواسير تمر عليها هذه الكمية من المياه الباردة – فى مواسير أخرى – وعن طريق التبادل الحرارى يكتسب الماء البارد الحرارة الموجودة فى البخار حتى يتكثف. مع ملاحظة أن دورة التبريد دورة مفتوحة

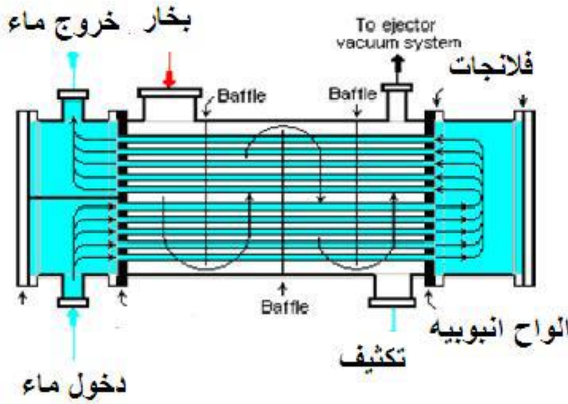




Figure 2-11 المكثف

أى أن الماء يتغير بشكل مستمر حتى يطرد الحرارة التى اكتسبها فى النهر أو البحر ثم ينتقل البخار المكثف إلى المضخة الذي يعيد ضخه للغلاية .

وفى حالة عدم وجود مصدر مائى للتبريد (نهر مثلا) يمكن استخدام أبراج التبريد كما فى الشكل 2–12 ، حيث يدخل الماء من أعلى على شكل رذاذ Shower ويدخل تيار هواء من أسفل للتبريد فيتكثف الماء البارد لأسفل.

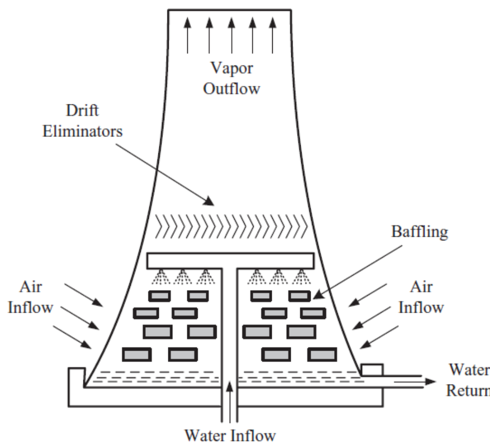


Figure 2-12 مخطط برج التبريد

وبالطبع سنفقد بعضا منه على صورة بخار وهذا هو السبب فى رؤية الدخان الأبيض من هذه الأبراج كما فى الشكل 2-13.



Figure 2-13 تصاعد بخار الماء من أبراج التبريد

وهذه صورة لإحدى المحطات فى أوهايو بأمريكا (وحدتين فقط بقدرة 2600 ميجاوات) وتظهر فيها بعض العناصر التى ذكرناها فى الجزء السابق.



2.6 الدورة البخارية تفصيليا

بعد عرض المكونات التفصيلية للقسم الميكانيكى بالمحطة ، يمكن الآن دراسة الدورة البخارية بصورة أكثر تفصيلا من خلال الشكل 2–14. وسوف نعتبر مجازاً أن بداية رحلة الماء داخل المحطة تبدأ داخل الغلاية حيث يدخل الماء بعد مروره على الـ Economizer إلى (الـ Drum) داخل الغلاية والذي يغذي مواسير المياه التي تغطي السطح الداخلي للغلاية ويتم تسخين الماء عن طريق الـ Burner يدخل إليه الوقود و الهواء الساخن المضغوط بحيث يحقق النسبة النظرية (Air/Fuel).

وبعد ذلك ينتقل البخار من (الدرم) ليمر خلال محمصات Superheaters لزيادة درجة حرارة وضغط البخار بمقدار كبير حينئذ يسمى هذا البخار بالبخار المحمّص حيث تصل درجة حرارته إلى (542 درجة مئوية وضغطه إلى (105 كجم/سم2)

ثم يمر هذا البخار المحمّص من خلال صمامات الـ Governer التي تفتح حسب الحمل المطلوب ليدخل إلى تربينة الضغط العالي ، فيتم تدوير الـ Shaft بواسطة هذا البخار المندفع ، بعد أن يتم البخار عمله داخل تربينة الضغط العالي يخرج البخار في درجة حرارة (320 درجة) ويكون الضغط أيضا قد انخفض إلى (30 كجم/سم2)

ثم يمر هذا البخار المستنزف (الذى فقد معظم طاقته) Exhaused مرة أخرى إلى الغلاية لإعادة تسخينه عن طريق ملفات تسخين Reheater ، حيث يخرج منها البخار في درجة حرارة عالية ولكن عند ضغط أقل من تربينة الضغط العالي ، ويدخل هذا البخار إلى تربينة الضغط المتوسط ويعمل على إدارتها. لاحظ أن ريش تربينة المرحلة الثانية أكبر من ريش المرحلة الأولى بسبب نقص الضغط.

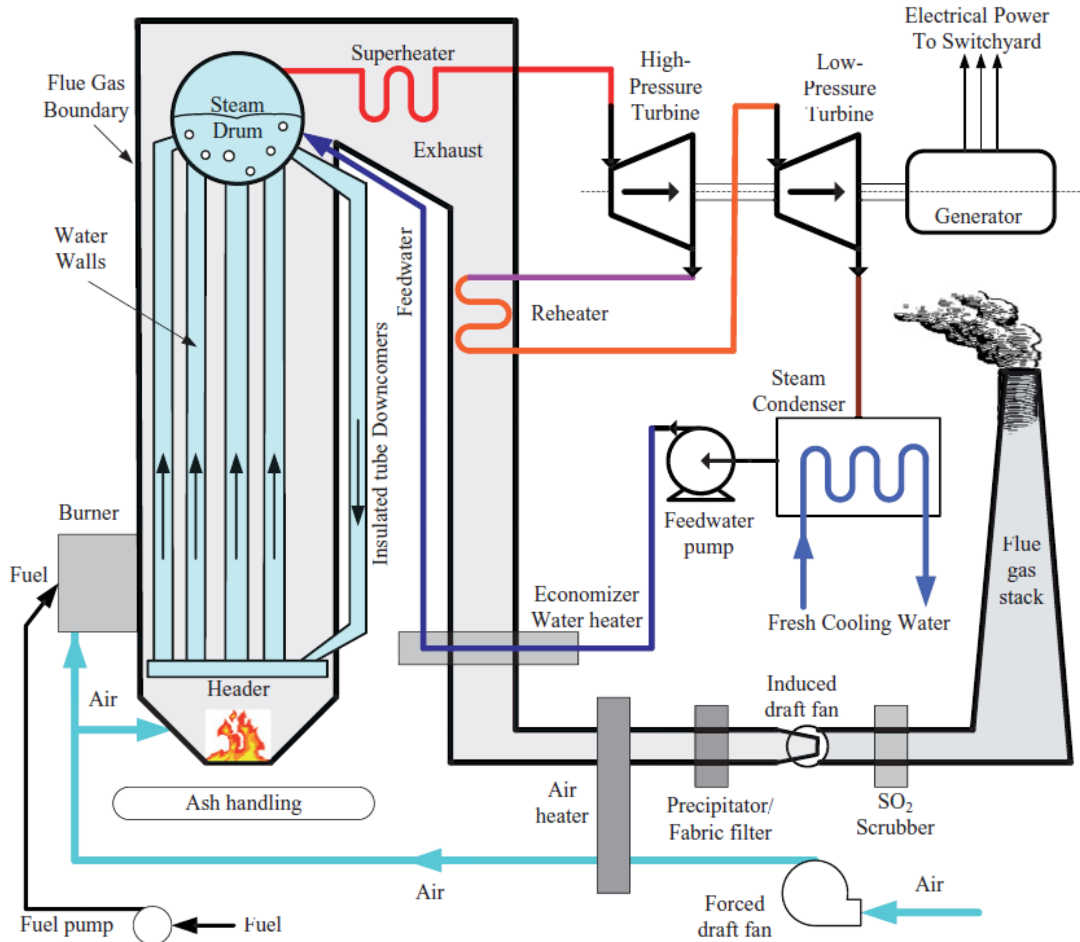


Figure 2-14 مخطط تفصيلى آخر للدورة البخارية

و فى بعض المحطات يدخل البخار من المرحلة الأولى من التربينة مباشرة على المرحلة الثانية من ريش التربينة مع التعزيز بكمية أخرى من البخار ، ثم يخرج البخار في هذه الحالة مباشرة إلى مرحلة الضغط المنخفض حيث تكون التربينة قد وصلت إلى أقصى عزم مرجو منها ويكون الناتج عن مرور البخار بمراحل التربينة الثلاثة وصول سرعة التربينة إلى 3000 لفة في الدقيقة وهي سرعة الدوران المطلوبة للحصول على التردد المطلوب (50 هرتز) وذلك تبعاً للقانون:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

وعند هذه السرعة يتم ربط التربينة بالمولد فيؤدي إلى دوران الـ Rotor ومن ثم توليد الكهرباء.

ينتقل بعد ذلك البخار بعد أن يكون استنفذت تقريباً كل طاقته إلى المكثف حيث يتم تكثيف البخار عن طريق خفض ضغطه وتبريده بماء بارد يسحب من النهر ويمر خلال ملفات. ويخرج الماء إلى مضخات ترفع ضغطه استعداداً لمروره على مسخنات الضغط المنخفض ومنها إلى الــDiviator الذي يعمل على تعويض الفاقد من الماء في هذه الدورة ويخرج الماء عند درجه حرارة 270 درجة ويدخل إلى طلمبة تغذية الغلاية لرفع ضغط الماء إلى الضغط المطلوب داخل الغلاية ثم يمر بعد ذلك إلى الموفر (Economizer) الذي يساهم أيضا في رفع درجة حرارة الماء والبخار. ثم يعود الماء إلى داخل الدرم ليقوم بدورة جديدة.

2.6.1 فصل الوحدة

إذا تم فصل التربينة بسبب حدوث خطأ ما يستدعى الفصل (مثل زيادة سرعة الدوران أو نقصها بدرجة كبيرة) فإن الغلاية بعد الفصل ستكون لاتزال تولد كمية بخار بدرجة حرارة وضغط عاليين ، وهذا قد يؤدي إلى انفجار الغلاية. وللتغلب على ذلك يتم عمل مسار فرعي يسمى By–pass لإكمال الدورة دون المرور على التربينة ويكون هذا المسار به صمامات مغلقة لا تفتح إلا عند فصل التربينة.

الجزء الثانى من الفصل الثانى

محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي

Internal Combustion Engines

محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي هي عبارة عن آلات تستخدم الوقود السائل (Fuel Oil) حيث يحترق داخل غرف احتراق بعد مزجه بالهواء بنسب معينة ، فتتولد نواتج الاحتراق وهي عبارة عن غازات على ضغط مرتفع تستطيع تحريك المكبس كما في حالة ماكينات الديزل أو تستطيع تدوير التوربينات حركة دورانية كما في حالة التوربينات الغازية .

وهى نوعان :

- النوع الأول: محطات التوليد الغازية (البسيطة والمركبة)
- النوع الثانى : مولدات الديزل

محطات التوليد الغازية

تعتبر محطات توليد الكهرباء الغازية حديثة العهد نسبيا ، ويعتبر الشرق الأوسط من أكثر البلدان استعمالا لها ، وهي ذات سعات مختلفة من 1 ميجاوات إلى 250 ميجاوات (وحدات سيمنس الجديدة تصل إلى 400 ميجاوات) ، و تستعمل عادة عند زيادة الحمل.

و يعمل التوربين الغازي على أنواع كثيرة من الوقود ، فهو يعمل على الغاز الطبيعي وعلى الديزل والجازولين وحتى على النفط الخام ، ومن مزاياه سرعة التشغيل (عدة دقائق) بعكس التوربين البخاري الذي يحتاج إلى تجهيز وإعداد لعدة ساعات. ومن مزاياها أيضا أنها لا تحتاج لعمالة كثيرة ، وتشغل حيزا أصغر من المحطات البخارية.

ويعيب هذه المحطات احتياجها لكميات كبيرة من الوقود وانخفاض كفاءتها مالم تكن جزءا من محطة دورة مركبة. إضافة إلى أن عمرها الافتراضى (15 : 25) سنة يعتبر صغير نسبيا مقارنة بالبخارية.

2.7 مكونات محطات التوليد الغازية :

الأجزاء الرئيسية التي تتكون منها محطة التوليد الغازية تظهر فى الشكل 2–15 . و فيما يلى سنشرح أجزائها بصورة تفصيلية:

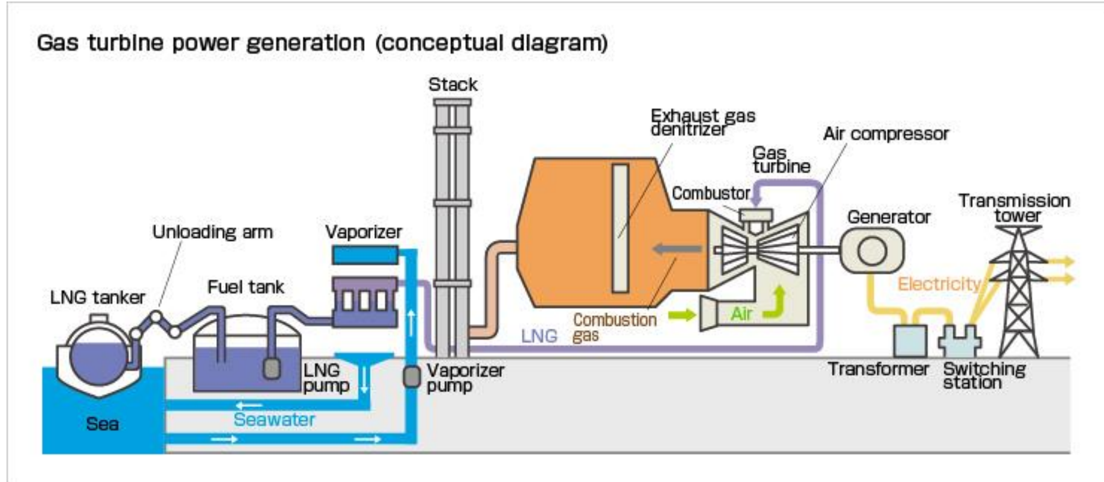


Figure2 -15 محطة توليد غازية

2.7.1 الكباس الرئيسي للوحدة

يعتبر الكباس الرئيسي – Air Compressor هو المحطة الأولى لدخول الهواء اللازم لإتمام عملية الاحتراق فيدخل إليه الهواء بضغط 1 بار ويقوم هو بضغط الهواء في مراحل متعددة تصل إلى 16 مرحلة فى بعض

الأنواع حتى يصل الضغط إلى 10.5 بار تقريباً فى المرحلة الأخيرة ، ثم يدخل الهواء إلى غرف الاحتراق ليختلط مع الوقود وتتم عملية الاحتراق (شكل 2-16).

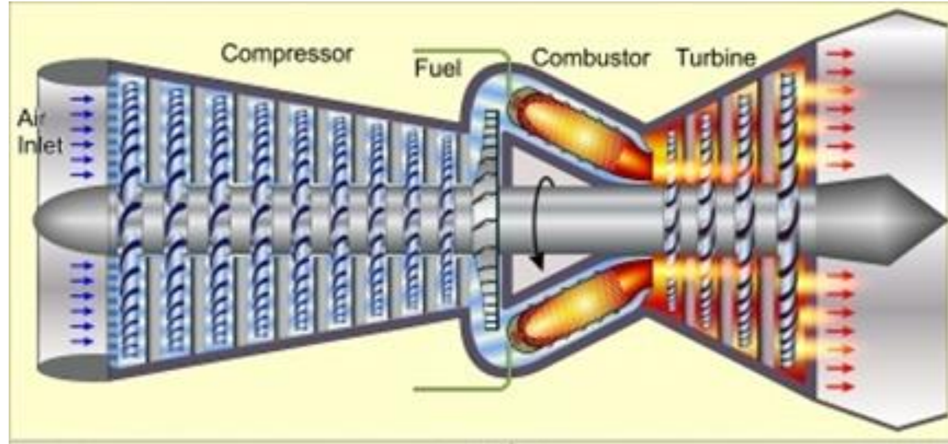


Figure 2-16 الأجزاء الرئيسية بالتربينة الغازية

ملحوظة:

يدخل الهواء أولا إلى الوحدة عن طريق الكباس الرئيسي للوحدة من خلال مجموعة من **الفلاتر** التي تعمل على تنقية الهواء الداخل إلى الكباس الرئيسي لأن دخول الأتربة على ريش الكباس ستتسبب فى تدمير الريش ، ولذا يوجد أيضا نظام للتنظيف الذاتي بحيث يقوم بتنظيف فلاتر الهواء من الأتربة المتراكمة فيها .

2.7.2 صمامات نزف الهواء BLOW OFF VALVES

لإيقاف الحمل على ضاغط الهواء COMPRESSOR في التربينة الغازية أو لإيقاف التربينة يتم فتح صمامات نزف الهواء للضاغط والتي بدورها تقوم بنزف الهواء إلى خارج الضاغط ليكون حمل الضاغط أقل من 30% . والهدف من ذلك تفادى حدوث surge في الضاغط بسبب اختلاف عزم الضاغط وعزم التربينة ، ويتم تمرير الهواء إلى مجرى العادم. مع ملاحظة أنه إذا حدث زيادة فى فرق الضغط ما بين فلاتر الكباس و مدخل الكباس فسيؤدى ذلك إلى وجود ضغط عكسي Back pressure يمكن أن يعمل على تدمير ريش الكباس الرئيسي.

2.7.3 غرفة الاحتراق

وفيها يختلط الهواء المضغوط الآتي من مكبس الهواء مع الوقود ويحترقان معا بواسطة وسائل خاصة بالاشتعال. وتكون نواتج الاحتراق من الغازات المختلفة على درجات حرارة عالية جدا و ضغط مرتفع.

يدخل الهواء إلى غرفة الاحتراق الداخلي والمكونة غالبا من غرفتين على جانب الكباس حيث يقوم الهواء بعمل وظيفتين :

- الاختلاط مع الوقود لإتمام عملية الاحتراق
- تبريد الجدران المحيطة بالغرفة

و الغرفة لها جدار داخلي يتكون من بلاطات مقاومة حراريا ثم مدخل الهواء الخارج من الكباس ثم نظام الوقود ويوجد على الغرفة نظام بادئ الإشعال Ignation system كما يوجد نظامين للحريق وهما Diffusion و الـ Permix

يقوم محول بادئ الإشعال بإعطاء إشارة الإشعال على المواقد Burners في نفس الوقت التي تقوم فيه المواسير الخاصة بالإشعال بإخراج الغاز إلى أن يتكون الحريق الأساسي "MAIN FLAME

وفي بداية تشغيل الوحدة يكون نظام الحريق Diffusion وهو عبارة عن لهب طويل ومركز يمر من أعلي نقطة في غرفة الحريق بعد الموقد إلى قرب نهاية الغرفة ليضمن وجود حريق في جميع أنحاء الغرفة.
وبعد أن تدخل الوحدة على الشبكة عند تردد 50 هرتز 3000 RPM وترتفع الميجاوات للوحدة تزداد درجة الحرارة إلى أن تصل إلى 470 درجة وعندها يتم التحويل من نظام الحريق Difusion إلى نظام الحريق premix

نظام الحريق : Premix هو لهب قصير وموزع بانتظام على الغرفة و يقوم بعملية الاحتراق دون أن يؤثر على الغرفة كنظام الـ Diffusion وهو يدخل من بعد درجة حرارة 470 درجة إلى أن تصل الحرارة إلى 500 درجة وهي أقصى درجة حرارة تتحملها الوحدة.

بعد أن تتم عملية الاحتراق داخل غرفة الاحتراق الداخلي نتيجة خلط الهواء المضغوط بضغط عالي مع الوقود سواء كان هذا الوقود وقوداً غازياً أو وقوداً سائلاً تكون نواتج الاحتراق غازات بدرجة حرارة تصل إلى 1050 درجة مئوية ومضغوطة بضغط عالي قد يصل إلى 10.5 بار عندها تدخل هذه الغازات إلى التربينة حيث يحدث تمدد لها داخل التربينة وتبدأ التربينة في الدوران.

2.7.4 التربينة الغازية

و هي عبارة عن تربينة محورها أفقي (شكل 2–17) مربوط من ناحية مع محور مكبس الهواء مباشرة و من ناحية أخرى مع المولد الكهربي فتدخل الغازات الناتجة عن الاحتراق في التوربين فتصطدم بريشها الكثيرة العدد من ناحية الضغط المنخفض وتخرج إلى الهواء عن طريق المدخنة .



Figure 2-17 تربينة غازية

2.7.5 المولد الكهربي

يتصل المولد الكهربي مع التوربين بواسطة صندوق تروس لتخفيف السرعة لأن سرعة التوربين عالية جدا بالنسبة لسرعة المولد . والمولد الكهربي يستخدم لتحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة عن دوران الـ shaft بين التوربين و المولد الكهربي إلى الطاقة الكهربية. وسنعرض بمزيد من التفصيل للمولد فى الفصل الخاص بالقسم الكهربى فى المحطات.

2.7.6 الآلآت والمعدات المساعدة للتربينة الغازية

تحتاج محطات التوليد الغازية إلى بعض المعدات و الآلآت المساعدة مثل:

1- مساعد التشغيل الأولى ، وهو إما محرك ديزل أو محرك كهربي
2- وسائل مساعدة على الاحتراق
3- آلآت تبريد مياه لتبريد المحطة
4- معدات قياس الحرارة والضغط في كل مرحلة من مراحل المحطة
5- معدات القياس الكهربية المختلفة مثل: الأميتر – الفولتميتر – الواتميتر

2.7.7 طريقة البدء فى المحطات الغازية

فى المحطات الغازية لا يتم عمل إشعال Fire للغاز الداخل على المولد من الثبات (بمعنى لا يبدأ الاحتراق إذا كانت التربينة لم تدر بعد) ، ولكن يتم تشغيل المولد باستخدام Starting Motor منفصل أو باستخدام Power Electronics-based Circuit تجعل المولد يبدأ العمل as motor ثم بعد الوصول لسرعة 550 لفة فى الدقيقة تقريبا يتم عمل Fire ودخول الغاز على التربينة.

ملحوظة:

البلاد التى تعتمد على استيراد الغاز لتشغيل محطات الكهرباء بها يجب أن تتوافر لديها البنية التحتية الخاصة بإعادة تحويل الغاز المسال إلى حالته الغازية *Regasification* ، وهذه البنية الأساسية تشمل إنشاء ميناء ومحطات تخزين (هناك أنواع من السفن تعمل كمصنع متحرك لإسالة الغاز المستورد وتستأجرها بعض الدول لحل أزمة الغاز فى محطات الكهرباء لديها).

النوع الثانى من محطات الاحتراق الداخلى:

توليد الكهرباء بواسطة الديزل

Diesel Power Station

تستعمل ماكينات الديزل (شكل 2-18) في توليد الكهرباء في أماكن كثيرة وخاصة في المدن الصغيرة والقرى . وهي تمتاز بسرعة التشغيل وسرعة الإيقاف ولا تحتاج مساحة كبيرة من الأرض لقلة المساعدات فيها ، ولا تحتاج لأعمال مدنية كثيرة عند الإنشاء.



Figure 2-18 مولد ديزل

ولكنها تحتاج إلى كمية مرتفعة من الوقود نسبيا وبالتالي فإن كلفة الطاقة المنتجة منها تتوقف على أسعار الوقود . ومن ناحية أخرى لا يوجد منها وحدات ذات قدرات كبيرة .

أما فى محطات القوى فتستخدم الماكينات ذات القدرات الكبيرة والتى تتراوح من 3 إلى 5 ميجاوات . وهذه المولدات سهلة التركيب وتستعمل كثيرا في حالات الطوارئ أو أثناء فترة ذروة الحمل . في هذه الحالة يعمل عادة عدد كبير من هذه المولدات بالتوازي لسد احتياجات مراكز الاستهلاك.
كما أن منها نوع يحمل على سيارات كما فى الشكل التالى . ويمكن نقله إلى الأماكن التى تحدث بها مشكلة كبيرة فى التغذية الرئيسية لها ، وتحتاج لتوليد مؤقت ، فيمكن بسهولة نقل هذه المولدات إليها (سعر الميجاوات يصل إلى حوالى مائة ألف دولار).



ومن عيوب هذه المحطات احتياجها لصيانة متكررة بسبب كثرة الأجزاء المتحركة فيها . وكعادة المحطات الحرارية لا تتجاوز كفاءتها 35% .

محطات الدورة المركبة

تتكون المحطات ذات الدورة المركبة Combined Cycle من وحدة غازية ووحدة بخارية ، حيث ينتج عن الوحدة الغازية نواتج احتراق تصل درجة حرارتها إلى500 درجة مئوية ، وهذه النواتج تهدر فى الجو دون استفادة منها.

و السؤال هنا كيف نستفيد من هذه الطاقة المهدرة؟

2.8 فكرة عمل الدورة المركبة COMBINED CYCLE

تقوم فكرة عمل الوحدات المركبة (شكل 2-19) على الاستفادة من الطاقة الناتجة من الغازات الساخنة الخارجة من التربينة الغازية في إنتاج كمية البخار اللازمة لتشغيل التربينة البخارية ، من خلال وحدات استعادة الطاقة Heat Recovery Steam Generator ، HRSG ، وهذه الوحدات تقوم مقام الغلاية والفرن فى الوحدات التقليدية ، مما يحقق توليد طاقة إضافية وتوفر ثلث كمية الوقود المستخدمة بالمقارنة بالوحدات البخارية. لاحظ أن الوحدة البخارية فى محطات الدورة المركبة لا تستخدم أى وقود بل فقط تستخلص الطاقة من غازات الوحدة الغازية.

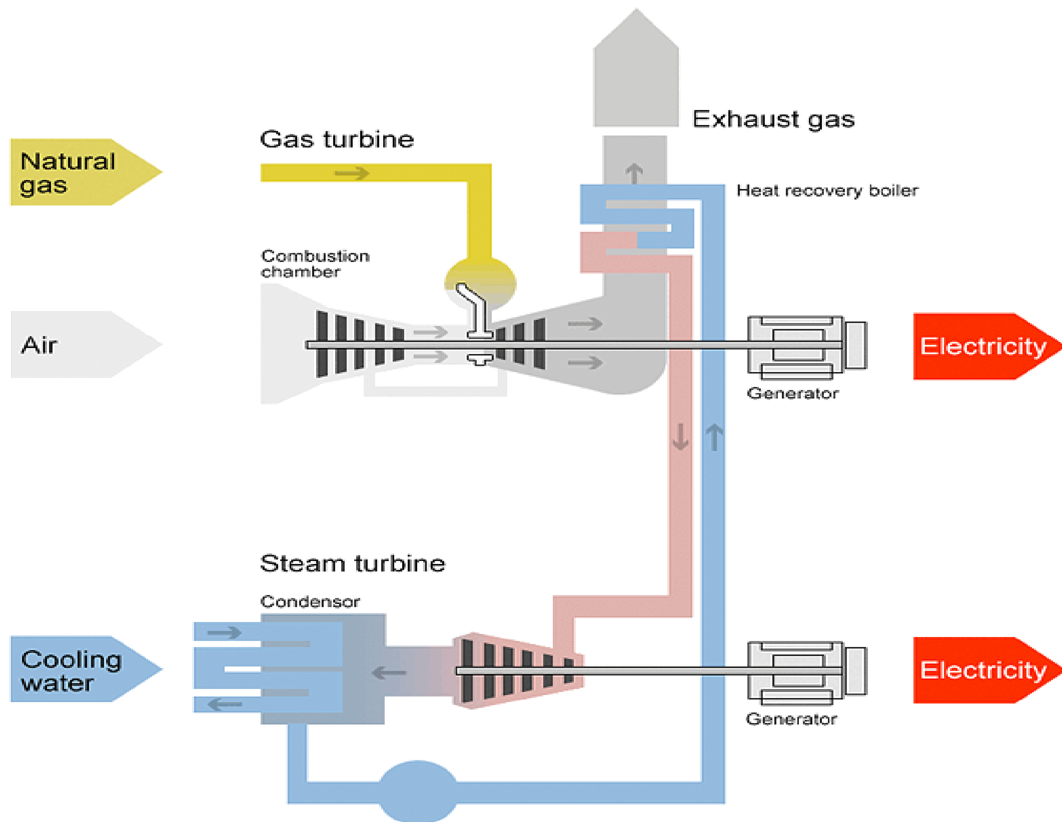


Figure 2-19 مخطط الدورة المركبة

يبدأ العمل من الوحدة الغازية بأخذ الهواء الجوى بعد مروره على الفلاتر لتنقيته ، ثم يدخل على الضاغط الذى يقوم بضغط الهواء ، ثم يمر على غرف الاحتراق وتخرج الغازات المحترقة من غرفة الاحتراق للدخول على التربينة الغازية وبعد ذلك يدور المولد وتتولد الكهرباء (من الوحدة الغازية).

أثناء ذلك تمر الغازات الساخنة الخارجة من التربينة الغازية إلى وحدة الـ HRSG لتحويل المياه إلى بخار كما سبق شرحه فى المحطات البخارية. لاحظ أن المحطات الغازية كفاءتها بمفردها لا تتعدي 30% ، لكن عند تركيب وحدة بخارية معها تزيد الكفاءة للإثنين معا إلى ما يقرب 52% . (وحدات الجيل الجديد تصل إلى 61%)

2.8.1 وحدة الـــ HRSG:

وحدات استعادة الطاقة Heat Recovery Steam Generator ، HRSG والتى تظهر فى الشكل 2-20 تقوم مقام الغلاية والفرن فى الوحدات التقليدية فى آن واحد وهو بالفعل كذلك حيث يتكون داخليا من :

Economizer ، Evaporator ، Superheater and Water preheater

ووظيفته استخلاص الحرارة من الغازات القادمة من الوحدة الغازية فى توليد البخار اللازم للوحدة البخارية.

ومن مهام الـ HRSG الأخرى أنه يتم من خلالها التحكم في الانبعاثات الناتجة من العوادم التي تخرج للهواء عن طريق نوعين من المحفزات Catalysts متواجدين في الـ Heat Recovery Steam Generator (HRSG) ، أولهم يتحكم في مقدار أول اكسيد الكربون الموجود في العوادم ، و الآخر يتحكم في أكاسيد النيتروجين .



Figure 2-19 Heat Recovery Steam Generator

وبعض أنواع من الـ HRSG تكون مزودة بـ duct firing من أجل إعطاء مزيد من الطاقة أكثر من التى حصل عليها من خرج الوحدة الغازية من أجل الحصول على كمية أكبر من البخار.

2.8.2 كفاءة محطات الدورة المركبة:

يساهم هذا الأسلوب في رفع كفاءة المحطة بسبب استخدام نفس مصدر الطاقة حيث أن ثلث القدرة تنتج من البخار (18%) و الثلثين (31%) من الغاز أو الوقود الحفري المستخدم. وتصل كفاءة المحطة إلى حوالي 49% كما فى الشكل 2–21 ، و يمكن الاستفادة أيضا من درجة حرارة هواء العادم الذى يخرج من الـ HRSG و التي تصل إلى 140 درجة في الاستخدمات الصناعية الأخرى .

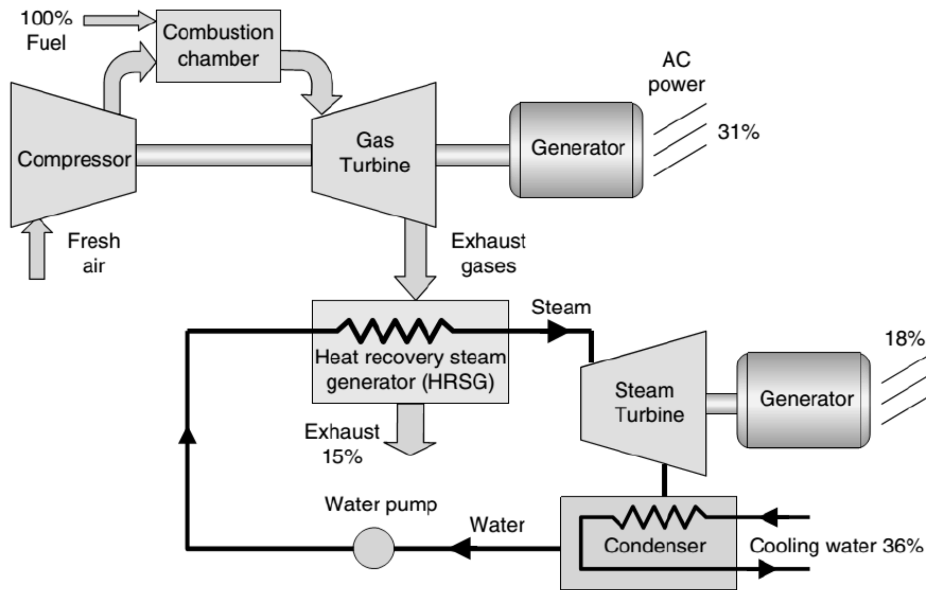


Figure 2-21 كفاءة محطات الدورة المركبة

2.8.3 مزايا محطات الدورة المركبة :

- تكلفة محطات الدورة المركبة أقل بكثير من نظيرتها من المحطات التي تعتمد فقط على البخار لنفس القدرة الكهربية Steam power plants.
- لا تحتاج الكثير من الوقت للصيانة.
- المخلفات الصلبة تعتبر أقل بكثير من المحطات الأخرى .
- المحطة لاتحتاج إلى مصدر طاقة خارجي لبدء التشغيل في حالة خروجها عن العمل للصيانة.

- سرعة الدخول على الشبكة حين الحاجة إليها.

2.8.4 أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر :

1. محطة طلخا في المنصورة – سعة : 750 ميجاوات
   - تتكون من وحدتين غازيتين كلا منها 250 ميجاوات بالإضافة إلى وحدة بخارية بسعة 250 ميجاوات.
2. محطة دمنهور – سعة 158 ميجاوات
   - عدد 4 توربينات غازية قدرة كل منها 25 ميجاوات + تربينة بخارية بقدرة 58 ميجاوات.
3. محطة الكريمات المركبة 1 و 2 :
   - كلا منها يتكون من 2 تربينة غازية بقدرة 250 لكلا منها + تربينة بخارية 250 ميجاوات. وهى تعمل بوقود الغاز الطبيعي كوقود أساسي ووقود السولار كوقود بديل وترتبط هذه الوحدات المركبة بالشبكة الكهربية الموحدة من خلال ست دوائر كهربائية جهد 220 كيلو فولت و تغذي محطات محولات و تغذي محطات محولات دمو و بني سويف و البساتين.

والشكل 2–22 يمثل صورة لإحدى محطات الدورة المركبة فى فرنسا



Figure 2 -20

Compined Cycle PP (500 MW) 61% effeccincy

3

القسم الكهربى فى محطات التوليد

هو الجزء المسئول عن إنتاج الطاقة الكهربية في منظومة القوي ، بمعنى آخر هو الجزء المسئول عن تحويل الطاقة الحركية الدورانية إلى طاقة كهربية . وفيما يلى أهم العناصر والمنظومات فى القسم الكهربي بمحطات التوليد :

1- المولد الكهربي (Generator)
2- المحولات (Transformers)
3- منظومة المجال المغناطيسي (Excitation System)
4- دوائر الـ Power Circuits التي تقوم بنقل القدرة من المولدات إلى محولات الرفع
5- دوائر القدرة المساعدة لتغذية جميع مساعدات المحطة
6- خلايا الجهد المتوسط (Switch Gear 6.3 KV)
7- حوش المفاتيح (Switch Yard)
8- خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة (Power Center)
9- خلايا الجهد المنخفض (Motor Control Center ، MCC)
10- منظومة الجهد الغير منقطع (Un Interruptable Power Supply ، Ups)
11- دوائر الإنارة لإضاءة المحطة وإمداد القدرة لأجهزة الخدمة والصيانة
12- منظومة البطاريات والشواحن (Battery & Battery charger)
13- منظومة القياس:- (MEASURMENT SYSTEM)
14- منظومة الاتصالات: (COMMUNICATION SYSTEM)
15- نظام تحكم إشرافي عن بعد SCADA SYSTEM
16- نظام التحكم:(CONTROL SYSTEM)
17- منظومة الحماية: (PROTECTION SYSTEM)

وفيما يلى نتحدث بشئ من التفصيل عن بعض العناصر السابقة الممثلة للقسم الكهربى فى المحطات ، ويستكمل الحديث عن البعض الآخر فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل Substations .

3.1 مكونات المولد الكهربى

أهم عنصر فى القسم الكهربى هو بالتأكيد المولد. وهو دائما من النوع المعروف بالـ Synchronous Generator . ويتكون Synchronous Generator من جزئين أساسيين هما Rotor and Stator ، حيث توضع ملفات الـ Field فى الجزء الدوار Rotor الذى يتصل بالتربينة مباشرة ، وهى التى تعطيه الحركة فيدور ، فيقطع الفيض المتولد فيه الملفات الموجودة داخل Stator ، فيتولد بها جهد كهربى ، أو بمعنى آخر تتولد القدرة الكهربية التي ينتجها المولد والتى تستخدم فى تغذية الأحمال.
و يتم تغذية ملفات المجال (field) بتيار مستمر (dc voltage) عن طريق منظومة الإثارة Excitation System التى سنتحدث عنها لاحقا .

والشكل 3-1 يمثل أهم الأجهزة المتصلة بالمولد كما يظهر فى مخططات المحطة ، ويليه شكل أكثر تبسيطا .

وفيه تلاحظ أن المولد يغذى المحول الرئيسي للوحدة Generatot Step Up Transformer ، GSUT كما يغذى أيضا مباشرة كلا من المحول المساعد Unit Auxilary Transformer ، UAT و يغذى كذلك محول تغذية منظومة المجال المغناطيسي Excitation transformer.
لاحظ وجود مصادر تغذية خارجية External Source مركبة على دوائر المساعدات للمولد ، لأنه فى حالة خروج المولد من الخدمة لا يمكنه أن يسترجع التشغيل دون وجود المساعدات أولا ، وهذه المساعدات تحتاج لمصدر طاقة ، وبما أن المولد لم يرجع للخدمة بعد فلذلك احتجنا لوجود هذه المصادر الخارجية ، التى قد تكون مجرد اتصال بالشبكة العامة أو اتصال بمولد طوارئ بالمحطة.

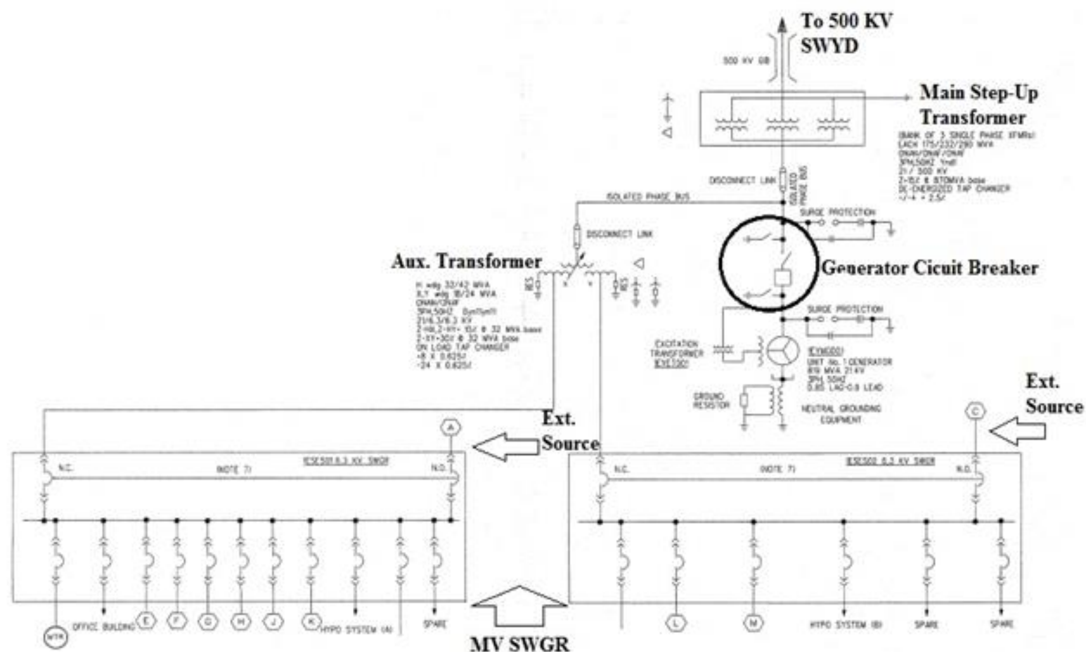
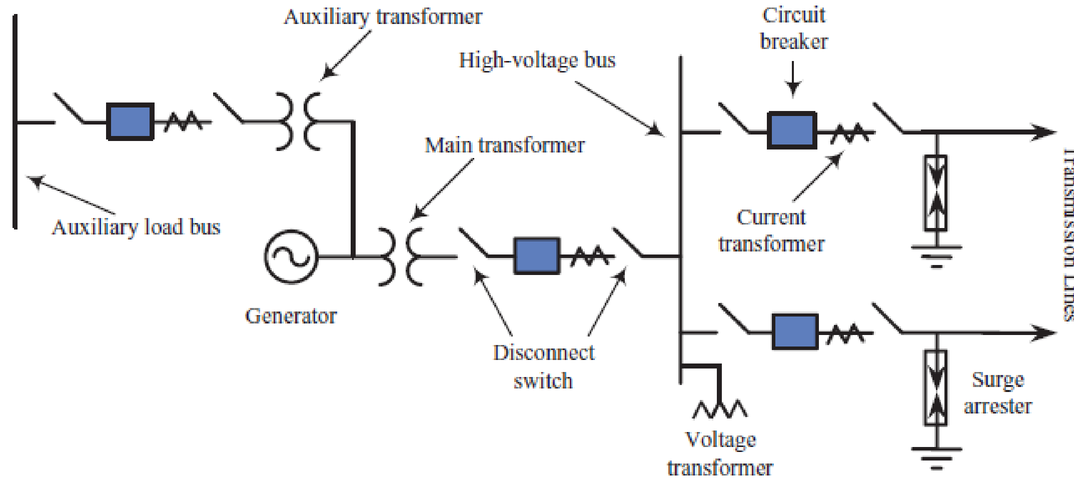


Figure 3-1 Generator SLD

والشكل السابق بصورة مبسطة يبدو كما يلى:



وهذه بعض مواصفات للعناصر التى ظهرت فى الشكل السابق:

- Main generator : Turbo generator ، 19KV ، 0.85 pf ، 440 MVA ، 3000 rpm ، 50 Hz
- Main Step-Up Transformer : 19/500 KV ، 480 MVA ، two winding ، Shell Type ، ONAF
- Auxiliary Transformer : 19/6.6/6.6 KV ، 40 MVA ، Three winding ، Core Type ، ONAF
- Medium voltage switchgear : 6.6KV ، 2500 A ، 40KA short circuit capacity
- Isolated Phase Bus duct (IPB): that connecting Generator ، Aux Transformer and Main Transformer ، 19KV ، 16000A.

وفيما يلى بعض التفاصيل عن مكونات المولد.

3.1.1 العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor

أما الـ stator فهو عبارة عن رقائق من الصلب السليكونى معزولة عن بعضها بمادة الميكا مكونة معا مجارى أو slots ملفات العضو الثابت كما فى الشكل 3-2.



Figure 3-2 Stator

وهناك ملفات العضو الثابت Stator Windings : وهى الملفات التي تنشأ بداخلها القدرة الكهربية المتولدة وتتصل بالمحول الرئيسي مباشرة لنقل هذه القدرة للشبكة الكهربية الموحدة عن طريق محطة المحولات.

وأما الـ Rotor فهو أيضا عبارة عن رقائق من الصلب السليكونى معزولة عن بعضها بمادة الميكا مضغوطة ومركبة على عمود Shaft مكونة معا مجارى العضو الدوار كما فى الشكل 3-3.



-

Figure 3-3 Rotor

وملفات المجال Field Windings : موجودة بالعضو الدوار وتتغذى من منظومة الإثارة Excitation System لتكوين المجال الكهربي اللازم لعملية توليد الكهرباء عن طريق Bruches ، وتتم عملية نقل الكهرباء إليها عن طريق فرش من الكربون تنقل التيار Field Current إلى الملفات الموجودة بالعضو الدوار .

3.1.2 منظومة التبريد

يحتاج المولد إلى منظومة تبريد بسبب الحرارة الناتجة عن المفاقيد الكهربية والمغناطيسية الناتجة عن مرور التيار الكهربي . ويتم التبريد عن طريق منظومتين :

- منظومة الهيدروجين Hydrogen Plant .
- ماء منزوع الأملاح Demi Water ضمن منظومة Stator Cooling

واستخدام الهيدروجين فى التبريد له ميزات وعيوب ، فمن ميزاته القدرة التبريدية العالية وأنه عازل جيد وأيضا له قدرة عالية على التوصيل الحرارى أكثر من أى غاز آخر ، لكن العيب الخطير أنه يشتعل وينفجر إذا اتحد مع الأكسجين حين تزيد نسبته فى الحيز المغلق عن 14% (لاحظ أنه معزول تماما عن الأكسجين داخل المولد) .
ومن هنا كان من أهم إجراءات السلامة عند حدوث عطل بالمولد سرعة طرد الهيدروجين من المولد وذلك بتوصيله بـ Vents عالية خارج المحطة فى الهواء الطلق وتسمى باللهجة المصرية عملية التفنيت ، وإلا ستنفجر الوحدة.
ودائما يكون هناك داخل محطة التوليد معمل لفصل الهيدروجين من الماء بالتحليل الكهربى ، ثم تعبئته فى اسطوانات كما فى الشكل 3-4 لاستخدامه إذا حدث تسريب للهيدروجين الأصلى.



اسطوانات غاز الهيدروجين بالمحطة Figure 3-4

3.1.3 كيف يتم توليد المجال المغناطيسي؟

وبصفة عامة فإن الـ Generator عمليا يحتاج إلى ثلاث عناصر إضافية أخرى (سوى الـ Rotor and stator) ليعمل بصورة صحيحة وهو :

Exciter ---- Permanent Magnet ---- Automatic Voltage Regulator .

أما الـ Exciter فهو عبارة عن 3-phase generator صغير نسبيا مقارنة بالمولد الأصلى ، وهو ينتج جهد منخفض (حوالي 500 فولت) ، وتيار عالي جدا (حوالي 5000 أمبير) ، ويركب هذا المولد الصغير على نفس الـ Shaft الخاص بالمولد الأصلى الكبير. ووظيفته هو تغذية الـ Field الخاص بالمولد الأصلى بتيار DC ، وهو التيار الذى ينتج الفيض المغناطيسى الذى سيقطع ملفات الـ Stator لينتج فيها الكهرباء.

وهنا يبرز سؤالآن:

الأول: كيف نحصل على تيار DC من داخل الـ Exciter رغم أنه مولد 3-phase ؟

الثانى : من أين يحصل المولد الصغير" Exciter " على تيار الـ Field الخاص به ؟

3.1.4 العناصر المرتبطة بمنظومة الـ Excitation

بالنسبة للسؤال الأول فإن التيار الـ 3-phase المولد من مغذى المجال (الـ Exciter) يتم عمل Rectification له لتحويله من تيار متردد إلي تيار مستمر عن طريق وحدة تحويل تركب داخل المولد.

أما بالنسبة للسؤال الثانى فإن ملفات الـ Field الخاصة بالـ Exciter فى الوضع الطبيعي تحصل على تيارها من المولد الأصلى.

و لكن المولد الأصلى لم يبدأ العمل بعد انتظارا للتيار القادم من الـ Exciter ، وهو ما يشبه الفزورة القديمة : من جاء أولا البيضة أم الدجاجة؟.

ولحل هذه المشكلة تزود المولدات بـ 3-Phase Generator آخر قبل الـ Exciter ، وهو أصغر منه حجما (جهده حوالي 100 فولت) ، لكنه يتميز بأنه مزود بمغناطيس دائم قوى Permanent Magnet ويسمى هذا المولد بـ PMG ، حيث يولد هذا المغناطيس الدائم فيضا مغناطيسيا يكفى لبدء تشغيل PMG الذى سينتج 3-phase current يتم توحيده بواسطة دائرة توحيد مشابهة للمستخدمة مع الـ Exciter ليقوم بتغذية ملفات الـ Field الخاصة بالـExciter .

وبالتالي فالقصة تبدأ كما فى الشكل 3-5 من PMG الذى يغذى الـ Exciter الذى سينتج تيارا يتم توحيده ليكون هو تيار الـ Field للمولد الأصلى الكبير. مع ملاحظة أن التيار الناتج من المولد الأصلى سيخصص جزء منه لتغذية ملفات الـ Field لـ Exciter بدلا من PMG الذى يتم فصله بعد مرحلة البدء . والشكل يلخص هذه المراحل جميعا.

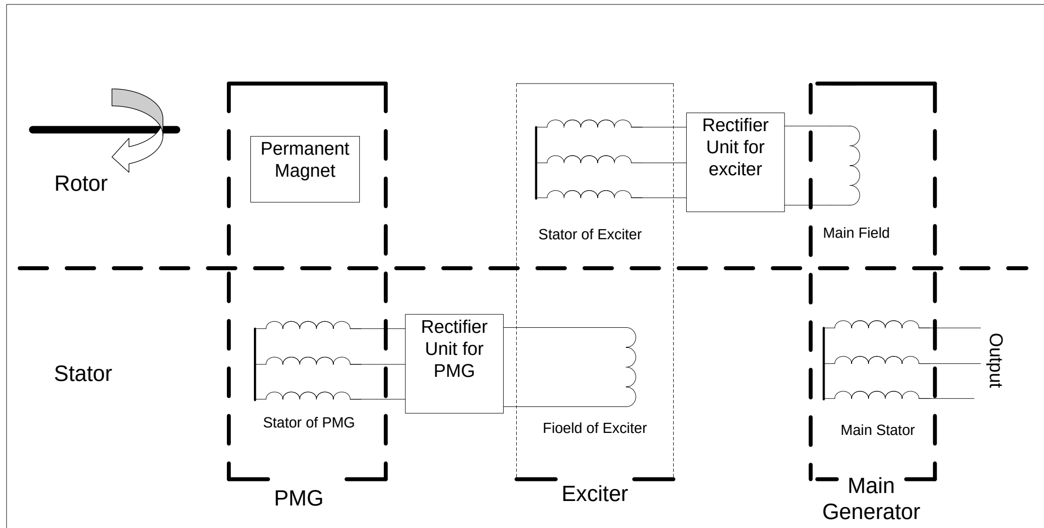


Figure 3-5 مخطط أجزاء المولد

أما الشكل الحقيقى لهذه العناصر فتظهر فى الشكل 3−6 .



Figure 3-6 صورة محطة توليد

و أثناء التشغيل الطبيعى فإننا نحتاج إلى الـ Automatic Voltage Regulator (AVR) الذى يقوم بضبط قيم الجهد عند أطراف المولد عند حدوث أى تغيرات غير طبيعية.

3.1.5 كيف يتم التحكم أتوماتيكيا فى قيمة الجهد؟

يتم ذلك عن طريق نظام تحكم أتوماتيكى فى الجهد Automatic Voltage Regulator ، وهو عبارة عن لوحة إلكترونية تحتوي على دوائر لتوحيد التيار وتحويله من تيار متردد AC (قادم من ملفات العضو

الثابت) ، إلى تيار مستمر (DC) يتصل بنظام الـ Excitation الرئيسي للمولد حيث تستخدم بعد رفع قيمة الجهد للمولد إلى القيمة المقننة كما فى الشكل 3-7. والـ AVR يتحكم أوتوماتيكيا فى نظام الـ Excitation بغرض تثبيت جهد المولد والتغلب على التغيرات المحدودة نسبيا فى قيمة الجهد.

إذا استشعر الـ AVR وجود تغير فى الفولت على أطراف المولد فإن حجم هذا التغير فى الجهد يترجم إلى تيار و إشارة للثيرستور ويغير قيمة الـ Firing angle للثيرستور من أجل زيادة قيمة تيار المجال ، وبذلك يزداد الفيض المغناطيسي ، ومن ثم يتم تعويض نقص جهد المولد الرئيسي كما فى الشكل 3-7.

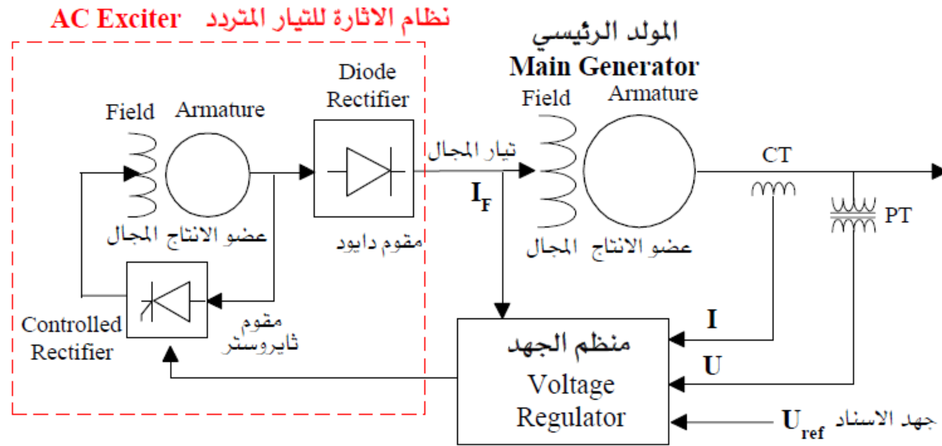


Figure 3-7 منظومة التحكم فى جهد المولد

3.1.6 الجيل الجديد من المولدات

جميع المولدات الكهربية المستخدمة فى الأنواع السابقة تصمم بحيث يكون جهد التوليد فى المحطات التقليدية فى حدود 20 kV ، أما فى محطات الطاقة الجديدة فيكون غالبا أقل من ذلك (فى محطات الرياح يصل إلى 690V فقط) .

لكن الجديد الآن أن بعض الشركات بدأت فى إنتاج مولدات الجهد العالى (High Voltage Generators) ويطلق عليها اسم Powerformers.

والمولد ذو الجهد العالى (Powerformer) كما فى الشكل 3-8 والشكل 3-9 ، هو أحد التقنيات الحديثة فى مجال توليد الطاقة الكهربية ، وقد تم تصميم أول Powerformer بواسطة شركة ABB بسويسرا فى الخامس والعشرين من فبراير عام 1998. وتعتمد فكرة عمل الـ Powerformer على تصميم مولد لتوليد الطاقة على جهود عالية تصل إلى 400 كيلوفولت. ويتيح هذا التصميم توصيل الـ

Powerformer على الشبكة الموحدة مباشرة دون الحاجة لاستخدام المحول الرافع للجهد (Step–up Transformer).

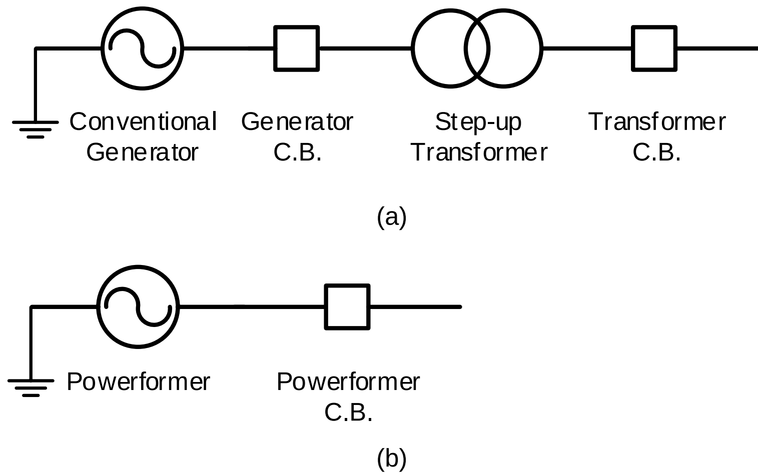


Figure 3-8

A نظام التوليد التقليدى باستخدام مولد ومحول رافع للجهد

B نظام التوليد باستخدام المولد ذو الجهد العالى (Powerformer)



Figure 3-9

المولد ذو الجهد العالى (Powerformer)

ويستخدم هذا المولد فى ملفات الجزء الثابت (Stator) كابلات XLPE تتحمل الجهود العالية كما فى الشكل 3–10 ، بدلا من استخدام الملفات ذات المقطع المستطيل (Rectangular Conductors) والتى تستخدم فى المولدات التقليدية. أما بالنسبة للملف الدوار (Rotor) فلا يوجد أى فرق بينه وبين المولدات التقليدية من حيث التصميم.



Figure 3-10

كابلات الـ XLPE ذات الجهد العالى فى ملفات الـ Stator لـ Powerformer

وفيما يلى بعض من المميزات الناتجة من استخدام الـ Powerformer:

1. الكفاءة الكلية لمحطات التوليد التى تستخدم الـ Powerformer تزيد قليلا (بنسبة 1.5 بالمائة تقريبا) عن المحطات ذات المولدات التقليدية.
2. لكن الميزة الأساسية هى أن التكلفة الكلية الثابتة (Total Fixed Cost) لمحطات التوليد التى تعتمد على الـ Powerformer أقل بكثير من التكلفة للمحطات ذات المولدات التقليدية لنفس قدرات التوليد. فعلى سبيل المثال فقد تم عمل دراسة على محطة مائية فى الهند إنتاجها السنوى حوالى 3200 جيجاوات ساعة. المحطة التقليدية تتكون من 4 تربينات مائية و 4 مولدات ، و 12 محول أحادى الوجه رافع للجهد (Single-phaseStep-upTransformer). وتم عمل الدراسة عن طريق إستبدال المولدات والمحولات بـ 4 من الـ Powerformers مما أدى إلى توفير ما يقرب من 24 بالمائة من التكلفة الكلية الثابتة وكذلك تكلفة الصيانة للمحطة.
3. استخدام الـ Powerformer يؤدى إلى توفير القدرة الكهربية غير الفعالة التى كانت ستضيع داخل محولات رفع الجهد.
4. استخدام الكابلات ذات المقطع الدائرى فى ملفات الـ Stator بدلا من الموصلات ذات المقطع المستطيل يؤدى إلى توزيع منتظم للمجال الكهربيى على الكابلات داخل الـ Stator للمولد مما يؤدى للإستغلال الأمثل للمولد وإمكانية رفع جهود التوليد دون ظهور إجهادات زائدة على العزل للكابلات.

3.2 المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد

توجد أربعة أنواع رئيسية من المحولات بمحطات التوليد ، وقد ظهروا فى المخطط الموجود فى مقدمة هذا الفصل :

1- محول الرفع الرئيسي step up transformer
2- المحول المساعد (محول خفض) unit auxiliary
3- محول بدء التشغيل (محول خفض) start up transformer
4- محول المجال المغناطيسي (محول خفض) excitation transformer

ويوجد أيضا محولات القياس التي تستخدم في قياس الجهد والتيار عن طريق تحويلهم لقيم مناسبة لاستخدامها عن طريق أجهزة القياس وأجهزة الوقاية.

وفى الجزء التالى نستعرض بعض تفاصيل هذه المحولات (الأرقام الواردة تخص إحدى محطة التوليد كنموذج وليس بالضرورة أن تتكرر هذه الأرقام فى كل المحطات)

محول الرفع الرئيسي step up transformer

وهو المحول الرئيسي للوحدة حيث أنه المسئول عن رفع الجهد الخارج من المولد إلى جهد شبكة النقل . فأما جهد المولد فيتراوح بين 15.75 إلى 23kV ، ومعظم جهود التوليد فى المحطات الكبرى فى مصر تكون 15.75kV سواء كان وحدات مائية مثل السد العالى ، أو بخارية مثل أبوقير وسيدى كرير ، وحتى المركبة مثل شمال الجيزة و النوبارية .
أما جهد شبكة النقل فمعظم محطات التوليد تتصل على شبكة الـ 220kV ، والنسبة الأقل تتصل على شبكة الـ 500 kV (عدد المحطات الموجودة على شبكة الـ 500 هو 9 محطات فقط فى الشبكة المصرية)
وغالبا يتم توصيل المولد على محول الرفع مباشرة بدون قاطع للدائرة بينهما (فى كثير من المحطات وليس كلها) ومن هنا كان المسمى Generator-Transformer set .

وتتكون منظومة التبريد للمحول الرئيسى من مجموعة من مبردات الزيت يصل عددهم فى بعض الحالات إلى حوالى 22 ، بالإضافة إلى عدد 8 مراوح التبريد ، وعدد 2 مضخة لتقليب الزيت لزيادة كفاءة التبريد (الأرقام تخص محول معين وليست ثابتة فى كل المحولات) ، كما يحتوى المحول على مغير جهد من النوع off load tap changer.

2- المحول المساعد Unit Auxilary Transformer

المحول المساعد هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد لتوفير القدرة الكهربية اللازمة لتغذية خلايا الجهد

المتوسط 6.3 kV والمسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة. والمحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B).

3- محول بدء التشغيل Start Up Transformer

هو المحول المسئول عن تخفيض جهد الشبكة 220 kV لتوفير القدرة الكهربية عند بدء التشغيل أو حدوث عطل في المحول المساعد أو منظومة التحويل بينهم لتغذية خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV والمسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة والتى لا تستطيع الوحدة أن تبدأ أو تعمل بدونها ، والمحول يتصل بقاطع دائرة (C.B) مع بارة الـ 220 kV بمحطة المحولات.

4- محول المجال المغناطيسي Excitation transformer

ويسمى أيضا محول الإثارة هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد من مثلا 23 kV إلى 900 فولت لتوفير القدرة الكهربية اللازمة لتغذية منظومة المجال المغناطيسي Excitation والمسئولة عن توفير تيار المجال اللازم للمولد. وهذا المحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B).

3.3 الغرف والعنابر الرئيسية بمحطة التوليد

أ) **غرفة التحكم الرئيسية** : ويتم منها التحكم فى جميع أجزاء المحطة عن بعد (عمليات المناورات ومراقبة تحميل الدوائر والمحولات الموصلة بالمحطة .

ب) **غرفة قواطع الجهد المنخفض (400 ف متردد)**: وهى التى تمد محطة المحولات بمصدر التغذية للإنارة ، ودوائر التبريد للمحولات ومخارج الاستخدام للأفراد بالمحطة.

ت) **عنبر قواطع الجهد المتوسط (11ك ف)**: ويوجد به قضبان وقواطع الجهد المتوسط التى يتم توصيلها مع محولات مساعدة لخفض قيم الجهد واستخدامها لتغذية المساعدات بمحطة المحولات.

ث) **غرفة منظومة إطفاء الحريق:**

وتوجد بها مجموعة طلمبات ضخ المياه لأغراض الحماية من الحريق سواء على منظومة إطفاء الحريق للمحولات الرئيسية أو لمآخذ المياه العمومية بالمحطة والمخصصة لتوصيل خراطيم مكافحة الحريق. وتوجد بها بيارة رئيسية لإمداد المنظومة بالمياه وبيارة تعويض للحفاظ على ضغط المياه فى الأنابيب فى حالة إستعداد لحالات الحريق.

ج) عنبر خلايا الجهد المتوسط 6.3 ك ف

- هي عبارة عن خلايا تتكون من القضبان و مجموعة من القواطع الكهربية معزولة بسادس فلوريد الكبريت (SF6) لتغذية مساعدات الوحدة.
- تتغذى المنظومة من أحد مصدرين : إما المحول المساعد في حالة التشغيل الطبيعي وإما محول بدء التشغيل في حالة خروج الوحدة أو حدوث عطل في المحول المساعد.

3.4 منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد

3.4.1 خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة Power Center

- هي المنظومة المسئولة عن تغذية الأحمال عالية القدرة من 100−250 حصان ومراكز الأحمال MCC
- تتغذى عن طريق Dry Transformer جهد 6.3kV/ 400V فولت وهو محول خفض له مراوح تبريد ومصدر تغذيته من خلال خلايا الجهد المتوسط 6.3 ك ف.
- المنظومة تتكون من أربع أو خمس خلايا تغذى كل خلية مجوعة من الأحمال.

3.4.2 خلايا الجهد المنخفض Motor Control Center

تتكون من مجموعة من قواطع الجهد المنخفض كما فى الشكل 3−11 ذات سعة القطع المختلفة لتغذية الأحمال المنخفضة التي تقل عن 100 حصان مثل

- المحركات و البلوف Motor& Valve's
- لوحات الإنارة
- لوحات التوزيع (PDP)
- شواحن البطاريات Battery Charger
- منظومة الجهد الغير منقطع UPS

تتغذى خلايا الجهد المنخفض عن طريق مفتاح 800 أمبير يتغذى من خلايا الجهد المنخفض ذات القدرة العالية.



Figure 3-11 خلايا جهد منخفض

3.4.3 غرفة الشواحن والبطاريات :

غرفة الشواحن: وفيها يتم تحويل الجهد المتردد إلى جهد مستمر يستخدم فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ بالمحطة .

غرفة البطاريات : بها مجموعات البطاريات الحمضية المستخدمة فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ (110ف) وكذلك دوائر الاتصالات (48ف).

ملحوظة هامة:

العديد من الأجهزة الموجودة داخل محطة الإنتاج من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح ، و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحياتها.

بعض المحطات فى الصين بدأت فى جعل تغذية مساعدات المحطة كلها على الـ DC system بدلا من الاعتماد على الديزل وذلك لعمل Starting للمحطة بعد الـ Blackout ، لكن هذا بالطبع سيستلزم لذلك مساحات كبيرة لتخزين البطاريات. كما فى النظام التالي الذى يمثل منظومة بطاريات بقدرة 15 MW. فى الشكل 3−12.



Figure 3-12 محطة بطاريات قدرة ميجا ونصف

لمزيد من التفاصيل حول البطاريات والشواحن راجع الباب الثالث من هذا الكتاب.

3.5 المنظومات المساعدة فى القسم الكهربى AUXILILARY SYSTEMS

منظومة القياس (MEASURMENT SYSTEM)

وتستخدم في المحطات لقياس كل من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والتيار والجهد ، كما توجد العديد من القياسات الأخرى التي يتم إجراؤها إما على المولد مثل درجات الحرارة الملفات ، أو قياسات على المحولات مثل قياس درجة حرارة الزيت و منسوب الزيت بواسطة مرحل بوخلز . والهدف من كل أجهزة القياس هذه ومن عدادات القدرة والطاقة هو مراقبة أداء المنظومة.

وأجهزة القياس المستخدمة تتوقف على طبيعة العنصر المركبة عليه . فعلى سبيل المثال تكون أجهزة القياس المركبة على المولد هى:

1. جهاز قياس الجهد (فولتميتر) ويتغذى من V.T
2. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من C.T
3. جهاز قياس معامل القدرة (P.F) ويتغذى من V.T + C.T
4. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
5. جهاز قياس الطاقة غير الفعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى V.T + C.T
6. جهاز قياس الذبذبة (Hz) ويتغذى من V.T

3.5.1 منظومة الاتصالات (COMMUNICATION SYSTEM)

يتم عمل شبكة اتصالات بين وحدات المحطة نفسها ، وأيضا بين المحطة وغيرها من المحطات ، وهذه المنظومة هى التي تقوم بنقل البيانات من كافة أجزاء المحطة إلى غرفة التحكم بالمحطة ، كما تنقل أوامر التشغيل من مركز التحكم الموجود بالمحطة إلى المحطات الأخرى. راجع تفاصيل ذلك فى الباب الثالث من الكتاب.

3.5.2 نظام التحكم (CONTROL SYSTEM)

من خلاله يتم التحكم في كل المعدات والعناصر الهامة في المحطة حيث يتم التحكم في المولدات وفي معدل سريان القدرة والقدرة المتولدة من الوحدة وغيرها تبعا للتحميل على الشبكة. وهناك نظامان للتحكم (قديم وحديث) ويحسن الرجوع للتفاصيل فى الفصل الخاص بنظم التحكم الموجود بالباب الثالث من هذا الكتاب.

وكل دوائر التحكم يتم توصيلها في النهاية إلى غرفة التحكم المركزي بالمحطة للمتابعة والمراقبة.

3.5.3 منظومة الحماية:- (PROTECTION SYSTEM)

منظومة الحماية هي من أهم المنظومات بالمحطة. والشكل 3-13 يمثل نموذجا لمنظومة الحماية الكاملة على أحد المولدات. ويحسن الرجوع لكتاب نظم الحماية لتفصيل هذا الموضوع.

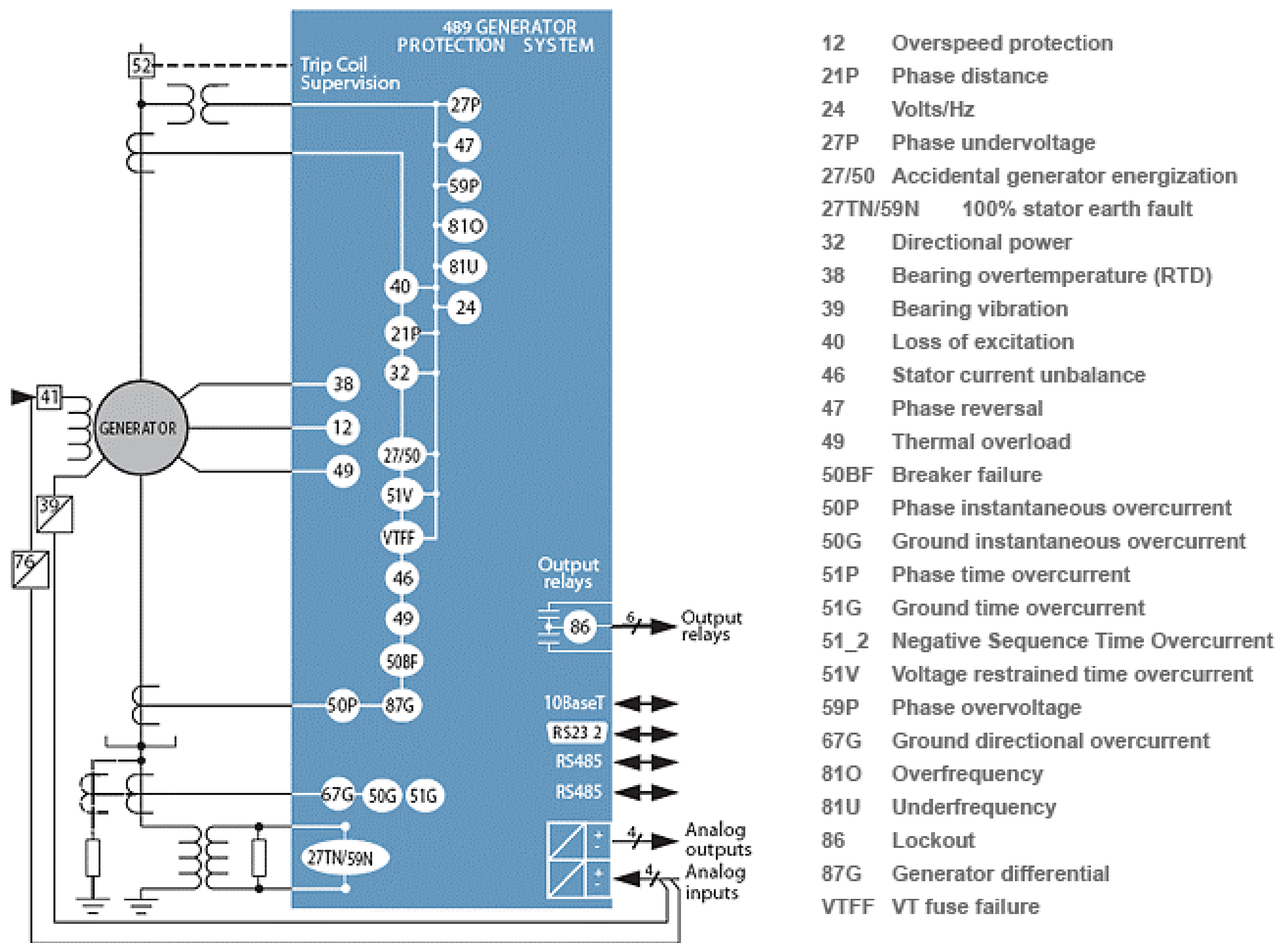


Figure 3-13 منظومة حماية المولد

نموذج للقسم الكهربى فى محطة توليد غازية

والمحطة التى نعرض تفاصيلها هنا مكونة من أربع وحدات توليد غازية (Simple cycle) قدرة كل وحدة 150 ميجا وات ، وأربعة محولات رافعة للجهد من 66kV إلى 220kV للربط بالشبكة ، مع نظام لتوزيع الجهد المنخفض والجهد المتوسط والجزء الخاص بالـــ common service building كما هو موضح بالـ Single Line Diagram الخاص بالمحطة.

3.6 مكونات النظام الكهربي:

- مولدات
- قواطع كهربية خاصة بكل مولد
- محولات رافعة للجهد
- يفصل بين كل مولد ومحول bus duct
- محولات خافضة للجهد من 15.75 KV إلى 6.3 KV (MV TR.)
- محولات خاصة بنظام الـ (excitation) للمولد متصلة ب bus bar الجهد المتوسط و متصلة أيضا بالـ(exciters) الخاص بالمولد
- محولات (3 winding) خاصة بتشغيل المولد (static starter) متصلة ب bus bar الجهد المتوسط
- مضخات لضخ الوقود (3-phase Motor 550KW) – UEL
- USG – Fire fighting pump 200KW
- محولات خافضة للجهد من 6.3KV إلى 400 فولت (LV TR.)
- وحدات توزيع للجهد المتوسط MV bus bar لتغذية محولات الخاصة بتشغيل المولد والخاصة بال(excitation) ومحولات الجهد المنخفض وتغذية الـــ motors الخاصة بالـــ oil pumps والـ motor الخاص ب fire fighting pump
- وحدات توزيع للجهد المنخفض LV bus bar لتغذية الــــــ Rectifiers المسئولة عن شحن بطاريات تغذية نظام الـ UPS ليدخل الخدمة في حالات الطوارئ
- نظام الـ UPS يتم تغذيته عن طريق DC bus bar الذي يغذي بدوره الـ inverters الذي يقوم بتغذية نظام الـ UPS
- مولد ديزل للطوارئ

3.6.1 كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربية:

كما ذكرنا في السابق في نظرية عمل المحطة أن الـ compressor مرتبط مع الـ turbine والمولد على نفس الـ shaft فيجب علينا بدء تحريك الـ turbine ولتحريك الـ turbine يلزم تشغيل الـ compressor لبدء عملية الاحتراق الداخلي فتكون خطوات التشغيل كالاتي (الحديث عن وحدة التوليد 28MKA01 فى الشكل 3−14):

- نقوم بفتح C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS001 الذي يربط بينه وبين المحول الخاص بالربط بالشبكة 2XBAT01
- نقوم بغلق C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS004 الذى يربط بينه وبين المحول المسـئول عن بدء تشغيل المولد 2XMBJ01
- يقوم المحول 2XBAT01 بتغذية المحول الخاص بشبكة الجهد المتوسط 2XBBT01 (بسحب باور من الشبكة) فتتم تغذية المحول 2XMBJ01 المسئول عن تشغيل المولد فتتم تغذية المولد ليعمل كموتور (motor) فيدور الـ shaft ويتم تحريك الـ turbine فيبدأ الـ compressor بالعمل فيتم ضخ الهواء إلى compassion room فيبدأ احتراق الوقود فتبدأ الـ turbine بالحركة من تأثير العادم الخاص بالوقود و نقوم بفصل الباور عن المولد عن طريق فتح الـ C.B XBAC01GS0042 فتقوم الـ turbine بلف الـ shaft حتى يصل للـ rated speed الخاصة بالمولد ثم نقوم بتغذية المحول الخاص بالـ excitation 2XMKC10 عن طريق غلق الـ C.B 2XMKC01GT001 & 2XBBT01GT001 فيبدأ المولد بالعمل ليصل إلى الـ synchronous speed ويبدأ بعملية التوليد حتى يصل المولد إلى لحظة التزامن بالشبكة فيتم الربط بالشبكة.
- في حالة الـ black out أو عدم وجود Power في الشبكة يقوم مولد الديزل XJ*0120 بدور المحول 2XBAT01.

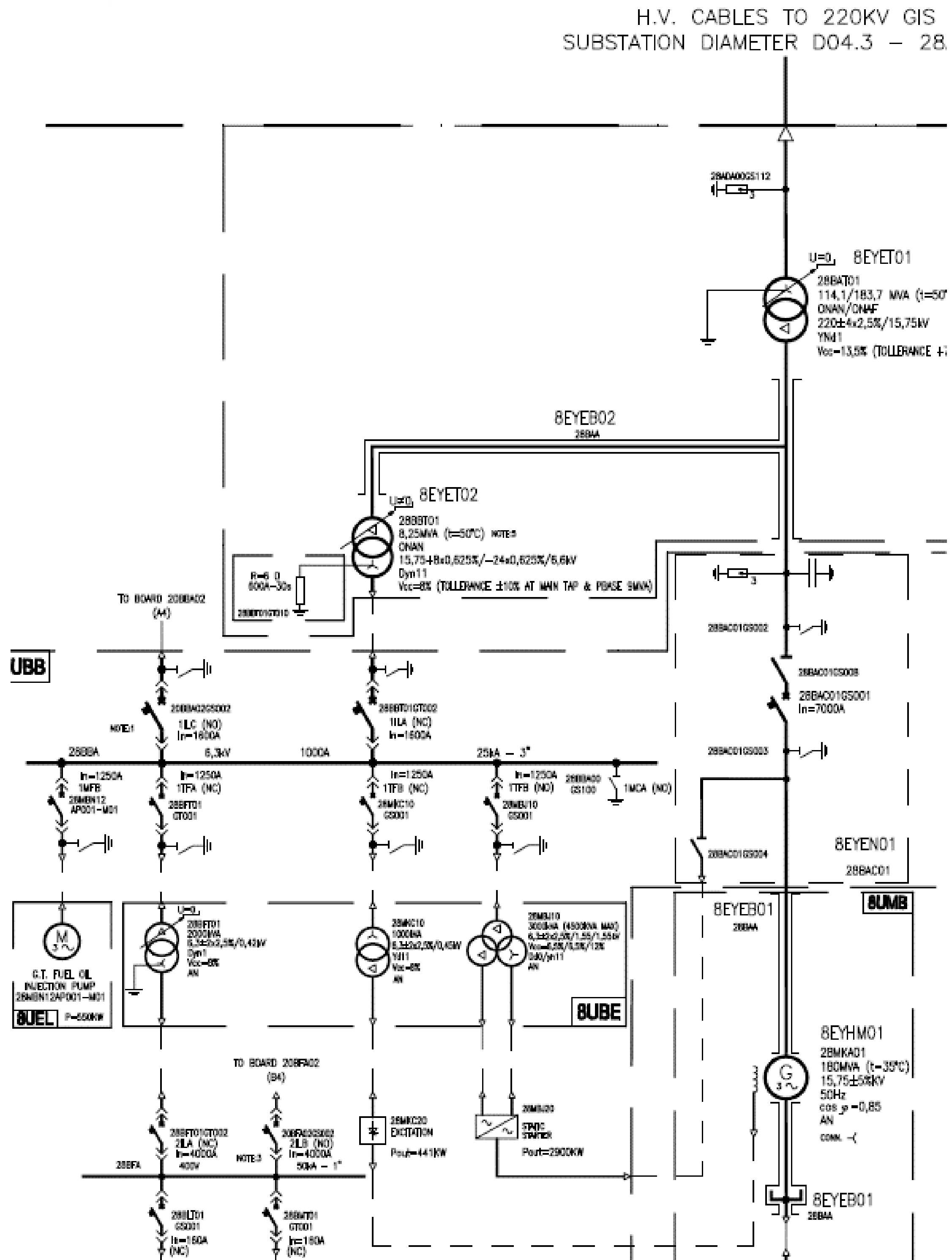


Figure 3-14

تفاصيل الأجزاء الرئيسية فى وحدة التوليد 28MKA01

4
محطات التوليد النووية

محطات التوليد النووية هى نوع من محطات التوليد الحرارية ، لأنها تعمل بنفس المبدأ وهو توليد البخار بالحرارة ثم يقوم هذا البخار بتدوير التوربينات التي بدورها تدير الجزء الدوار من المولد الكهربي وتتولد الطاقة الكهربية على أطراف الجزء الثابت من هذا المولد.

والفرق الرئيسى بين المحطات البخارية التقليدية والمحطات النووية هو أنه فى محطات التوليد النووية يستبدل الفرن الذي يحترق فيه الوقود بمفاعل نووى Reactor تتولد فيه الحرارة نتيجة انشطار ذرات اليورانيوم وتستغل هذه الطاقة الحرارية الهائلة في تبخير المياه في الغلايات وتحويلها إلى بخار ذي ضغط عالى ودرجة حرارة مرتفعة جدا .

والعجيب أن حقيقة أن تكون الحجارة وقودا لنار جهنم كانت شيئا مستغربا في قول الله سبحانه وتعالى في كتابه العزيز : (يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا قُوا أَنفُسَكُمْ وَأَهْلِيكُمْ نَاراً وَقُودُهَا النَّاسُ وَالْحِجَارَةُ عَلَيْهَا مَلَائِكَةٌ غِلَاظٌ شِدَادٌ لَا يَعْصُونَ اللَّهَ مَا أَمَرَهُمْ وَيَفْعَلُونَ مَا يُؤْمَرُونَ (6)) التحريم. وها نحن اليوم نعيش في العصر الذي استخدم البشر فيه أثقل أنواع الحجارة وهي التي تحتوي على عناصر اليورانيوم والثوريوم كوقود ينتج كميات هائلة من الحرارة التي تحول هنا فى المحطات النووية إلى طاقة كهربائية.

وهذا الـ Reactor يحتاج إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذري ولذا فهو يتكون من طبقة من الآجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية.
وكانت أول محطة توليد حرارية نووية في العالم نفذت في عام 1954 وكانت في الاتحاد السوفيتي بطاقة 5 ميجاواط. ولا توجد محطات توليد نووية مستعملة في البلاد العربية حتى الآن.

4.1 طاقة الربط النووي

تتكون نواة الهيليوم من بروتونين ونيوترونين ، وكان من المفترض أن يكون العلاقة بينهم كما فى الشكل 4-1:

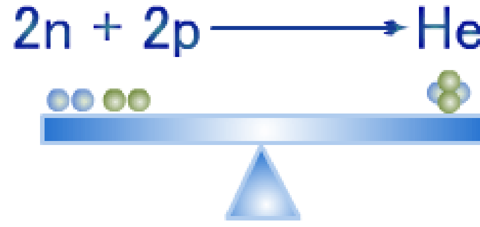


Figure 4-1

ولكن بمراجعة الأوزان الفعلية تبين أن:

تبلغ كتلة نواة الهيليوم 4.0015 وحدة كتلة ذرية .
تبلغ كتلة البروتون 1.0073 وحدة كتلة ذرية .
تبلغ كتلة النيوترون 1.0087 وحدة كتلة ذرية .

وبما أن نواة الهيليوم تتألف من بروتونين ونيوترونين ، لذا يمكن حساب كتلة نواة الهيليوم على النحو التالي :

كتلة بروتونين = 2 × 1.0073 كتلة نيوترونين = 2 × 1.0087
كتلة بروتونين = 2.0146 كتلة نيوترونين = 2.0174

مجموع كتل البروتونات والنيوترونات = 2.0146 + 2.0174
= 4.0320 وحدة كتلة ذرية

وبمقارنة كتلة الهيليوم الفعلية بمجموع كتل مكونات نواتها يلاحظ أن هنالك فرقاً في الكتلة كما في الشكل 4-2 :

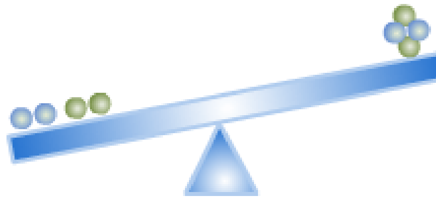
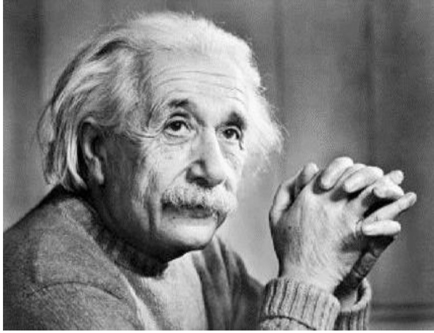


Figure 4-2

يبلغ الفرق في الكتلة بين نواة الهيليوم الفعلية ومجموع مكوناتها 0.0305 وحدة كتلة ذرية ، وتمكن الفيزيائي الألماني الأمريكي الشهير ألبرت أينشتاين (Albert Einstein 1879–1955) في عام 1907م من خلال



التحليل الرياضي البحت بإثبات أن الطاقة (energy) ، والمادة (mass) ما هما إلا وجهان لعملة واحدة أي أن المادة يمكن أن تتحول إلى طاقة والطاقة إلى مادة.

ولقد تمكن أينشتاين من وضع معادلته المشهورة

$$E = m C^2$$

وتدعى هذه الطاقة بطاقة الربط النووي BINDING ENERGY.

فعلى سبيل المثال فإن الطاقة النووية الناتجة عن تحويل جرام واحد من المادة بكامله إلى طاقة يساوي 85 ألف مليون وحدة حرارية بريطانية BTU ، والذي يساوي 25 مليون كيلواط ساعة ، أو ما يعادل الطاقة الناتجة عن حرق ما يقرب من خمسة آلاف طن من الفحم الحجري.

ملحوظة هامة:

1- عند انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم 235 فإن الفرق بين كتلة المادة قبل وبعد عملية الانشطار يساوي جرام واحد أى أن جراما واحدا تحول إلى طاقة وبقى 999 جرام كنفايات ، ولذا قد تجد نفس العبارة السابقة مذكورة فى مرجع آخر ولكن بدلا من كلمة جرام ستجد كلمة كيلو جرام ولذا وجب التمييز.

2- محطة توليد كهربائية بقدرة ألف ميجاوات تحتاج يوميا لتشغيلها إلى كيلوجرامين فقط من اليورانيوم 235 القابل للانشطار (المخصب فعليا). وهذه الكمية من الوقود يمكن توفيرها من خلال تزويد المفاعل بخمسين كيلوجرام من اليورانيوم المخصب بنسبة أربعة بالمائة (18 طن سنويا وتصل إلى 30 طن إذا نسبة التخصيب أقل) ، وتبقى هذه الكمية من الوقود قليلة جدا بالمقارنة مع 3 مليون طن من الفحم الحجري تلزم لتشغيل نفس المحطة سنويا.

4.1.1 فكرة الطاقة النووية

تفاعل الانشطار النووي هو التفاعل الذي يتم من خلاله إنتاج طاقة حرارية وضوئية عالية بالإضافة إلى جسيمات مثل بيتا (β) وألفا (α).

ويتم تحرير الطاقة النووية من خلال قصف نواة اليورانيوم 235 بنيوترون كما فى الشكل 4-3 ، ينتج عن هذا التصادم جزيء جديد غير مستقر سرعان ما تنشطر إلى جزيئين وما معدله 2 إلى 3 نيوترونات ، مصطدمة بالتالي بذرات يورانيوم أخرى

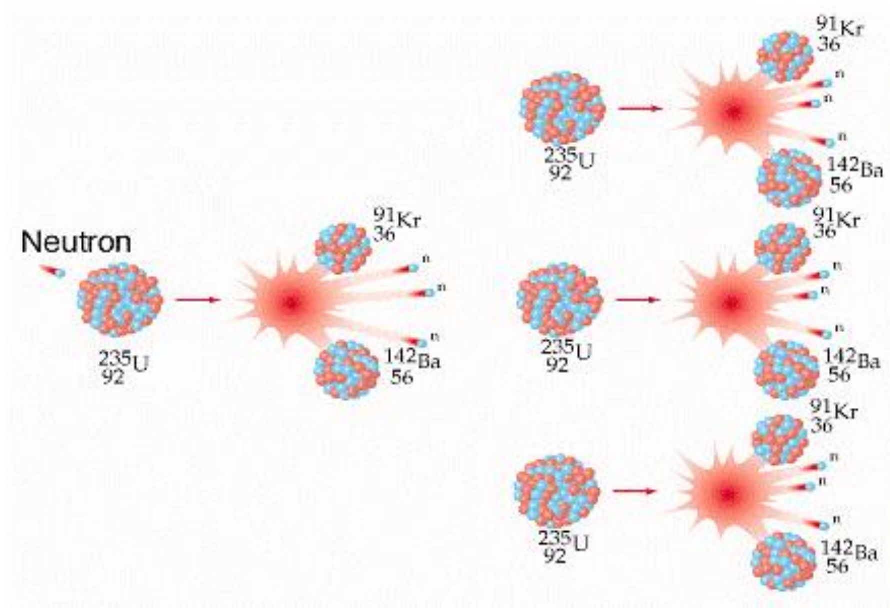


Figure 4-3 التفاعل المتسلسل

وهكذا تستمر عملية تحرير الطاقة وإنتاج نيوترونات ضمن ما يعرف بالتفاعل المتسلسل. وتبلغ كمية الطاقة التي تنبعث جراء انشطار ذرة واحدة من اليورانيوم 235 مائتين وإثنين مليون إلكترون فولت

(1 MeV = $10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J)

Example 2.17. *An atomic power reactor can deliver 300 MW. If due to fission of each atom of $_{92}U^{235}$, the energy released is 200 MeV, calculate the mass of uranium fissioned per hour.*

Solution.

Energy received from the reactor

$$= 300 \text{ MW} = 3 \times 10^8 \text{ W (or Js}^{-1})$$

$$\text{Energy received/hour} = (3 \times 10^8) \times 3600 = 108 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{Energy released/fission} = 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3{\cdot}2 \times 10^{-11} \text{J}$$

Number of atoms fissioned per hour

$$= \frac{108 \times 10^{10}}{3{\cdot}2 \times 10^{-11}} = 33{\cdot}75 \times 10^{21}$$

Now 1 gram-atom (*i.e.*, 235g) has $6{\cdot}023 \times 10^{23}$ atoms.

∴ Mass of Uranium fissioned per hour

$$= \frac{235}{6{\cdot}023 \times 10^{23}} \times 33{\cdot}75 \times 10^{21} = \mathbf{13{\cdot}17g}$$

Example 2.18. *What is the power ouput of a $_{92}U^{235}$ reactor if it takes 30 days to use up 2 kg of fuel? Given that energy released per fission is 200 MeV and Avogadro's number = $6{\cdot}023 \times 10^{26}$ per kilomole.*

Solution.

$$\text{Number of atoms in 2 kg fuel} = \frac{2}{235} \times 6{\cdot}023 \times 10^{26} = 5{\cdot}12 \times 10^{24}$$

These atoms fission in 30 days. Therefore, the fission rate (*i.e.,* number of fissions per second)

$$= \frac{5{\cdot}12 \times 10^{24}}{30 \times 24 \times 60 \times 60} = 1{\cdot}975 \times 10^{18}$$

$$\text{Energy released per fission} = 200\text{ MeV} = (200 \times 10^{6}) \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19} = 3{\cdot}2 \times 10^{-11}\text{J}$$

∴ Energy released per second *i.e.*, power output P is

$$P = (3{\cdot}2 \times 10^{-11}) \times (1{\cdot}975 \times 10^{18})\text{ W}$$

$$= 63{\cdot}2 \times 10^{6}\text{ W} = \mathbf{63{\cdot}2\ MW}$$

تنتج مفاعلات الطاقة النووية كمية هائلة من الطاقة الكهربائية من كميّة صغيرة من الوقود فبضعة جرامات من اليورانيوم تعطى كميّة من الطاقة تكافئ ما ينتجه طن واحد من الفحم. وهي كمّية تكفي لتشغيل كهرباء منزل لمدّة أربعة أشهر تقريباً ، دون أي انبعاث للكربون. (ملحوظة : إنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها إنبعاث 1041 طن من CO_2.)

4.1.2 تحقيق قانون أينشتاين

عام 1932 قام العالمان الانجليزيان كوكروفت J.D.Cockcroft ووالتون E.T.S.Walton باختبار صحة قانون أينشتاين عملياً ، فقد عمدا إلى قصف الليثيوم ببروتون ذو سرعة عالية فتكونت دقائق ألفا وكمية كبيرة من الطاقة . وقد صاحب التفاعل النووي السابق نقص في الكتلة مقداره 0.0186 وحدة كتلة ذرية.

وقد وجد كروكروفت ووالتون أن مقدار الطاقة المنبعثة من التفاعل تماثل مقدار الطاقة التي يمكن حسابها من معادلة أينشتاين ، وبذلك تم إثبات صحة قانون أينشتاين وإمكانية تحويل الكتلة إلى طاقة.

4.1.3 تخصيب اليورانيوم

على الرغم من أن جميع أنوية ذرات العناصر تحتوي على كميات متفاوتة من هذه الطاقة الكامنة إلا أن العلماء لم يتمكنوا من الحصول عليها إلا من خلال شطر أنوية بعض العناصر الثقيلة كاليورانيوم 235 (Uranium 235) المتوفر في الطبيعة ، والبلوتونيوم 239 (Plotonium 239) المصنع من اليورانيوم 238 ، واليورانيوم 233 (Uranium 233) المصنع من الثوريوم 232 (Thorium) ، وذلك من خلال عمليات الانشطار النووي (nuclear fission) .

ويتميز اليورانيوم 235 عن غيره بأن انشطار ذرته لا يتطلب طاقة عالية للنيوترونات المقذوفة بل أن الانشطار قد يتم بالنيوترونات الحرارية أو البطيئة والتي تقل طاقتها عن نصف إلكترون فولت.

وبصفة عامة ، تعتمد شدة التفاعل النووي المتسلسل على نسبة اليورانيوم – 235 في الوقود النووي ، فكلما كان اليورانيوم نسبته عالية كانت كمية الطاقة الناتجة أعلى ، ومن هنا تكمن الحاجة لفصل نظائر اليورانيوم عن بعضها للحصول على اليورانيوم – 235 أنقى وهذه العملية تسمى بعملية تخصيب اليورانيوم (enrichment process).

ملحوظة:
أن نسبة اليورانيوم القابل للإنشطار وهو اليورانيوم 235 في اليورانيوم الطبيعي نسبة متدنية لا تتجاوز سبعة بالعشرة بالمائة ولهذا فإنه يلزم رفع هذه النسبة بمقدار يتحدد من نوع الاستعمال. ففي القنابل الذرية يلزم أن تكون النسبة أعلى من تسعين بالمائة بينما تحتاج المفاعلات النووية الصغيرة (compact nuclear reactors) المستخدمة في الغواصات وحاملات الطائرات إلى نسب تصل إلى عشرين بالمائة وأما معظم أنواع المفاعلات النووية والتي تعمل بالماء الخفيف فتعمل بنسب تتراوح بين 3% و 5% بينما يعمل بعضها باستخدام اليورانيوم الطبيعي كمفاعلات الماء الثقيل.

ومن الصعب فصل نظائر اليورانيوم عن بعضها بطرق كيميائية لأن نظائر العنصر الواحد متشابهه في السلوك الكيميائي ، إلا أن اختلاف النظائر في السلوك الفيزيائي يسهل علينا فصلها عن بعضها ، فالنظيرين اليورانيوم – 235 ، واليورانيوم – 238 يختلفان عن بعضهما في الكتلة.

والعلماء الذين عملوا على صناعة القنبلة النووية اكتشفوا العديد من الطرق لفصل نظائر اليورانيوم ، منها آلات الطرد المركزى المستخدمة فى باكستان وايران ، ومنها أيضا طريقة الانتشار الغازي والتي تعتمد على الاختلاف البسيط في الانتشار خلال غشاء شبه منفذ بين اليورانيوم – 235 ${}^{92}U_{235}$ ، و اليورانيوم – 238 ${}^{92}U_{238}$ مما يؤدي إلى اتخاذ كل منهما مسارين مختلفين عند التأثير عليهما بمجال كهرمغناطيسي مما يؤدي إلى فصلهما.

ويتطلب تخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 5% حوالى عشرة كيلوجرامات من اليورانيوم الطبيعي بينما يلزم لتخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 90% إلى ما يزيد عن 150 كيلوجرام من اليورانيوم الطبيعي. ويطلق على اليورانيوم الطبيعي غير المخصب الناتج عن عملية التخصيب باليورانيوم المنضب (depleted Uranium) حيث أنه يحتوي على نسبة متدنية من اليورانيوم 235 لا تتجاوز ثلاثة بالعشرة بالمائة أي أنها أقل من تلك في اليورانيوم الطبيعي. وعملية التخصيب مكلفة جدا ولذلك فإن سعر الكيلوجرام الواحد من اليورانيوم المخصب بنسبة 5 % قد يصل إلى ألفي دولار.

4.2 مكونات المفاعل النووي

الشكل 4-4 يتظهر فيه مكونات المفاعل كما يلي:

1. **مركز المفاعل** أو **قلب المفاعل** وهو الجزء الذي يحتوي على وحدات الوقود النووي وتتم فيه سلسلة الانشطار النووي.
2. **السائل المهدئ** moderator ويستعمل الماء عادة لخفض سرعة النيوترونات وبالتالي معدل الانشطار النووي كما أنه ينقل الحرارة الناتجة من التفاعل النووي ويتحول جزء منه إلى بخار عالـي الضغط ، يستغل في تشغيل التوربين .
3. **هيكل الاحتواء** : يحتاج المفاعل إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذري وهو يتكون من طبقة من الآجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك متر ونصف أو مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية ..
4. **مبادلات حرارية** يخرج بخار الماء بضغط يبلغ 400 ضغط جوي وتكون درجة حرارته نحو 450 درجة مئوية بواسطة أنابيب متينة من المفاعل إلى المبادلات لفصل دائرتي الماء ، فالدائرة الأولى التي تلف في المفاعل وهذه تكون عالية الإشعاع نظرا لتلامسها مع الوقود النووي .لذلك تُفصل عن الدائرة الثانية للماء الساخن المضغوط ، ويتحول هذا الماء في الدائرة الثانية عند مغادرته المبادل الحراري إلى بخار ماء عالي الضغط والحرارة ويوجه إلى توربين لتوليد الكهرباء.
5. **مولد كهربائي عملاق** يديره التوربين ويولد التيار الكهربائي

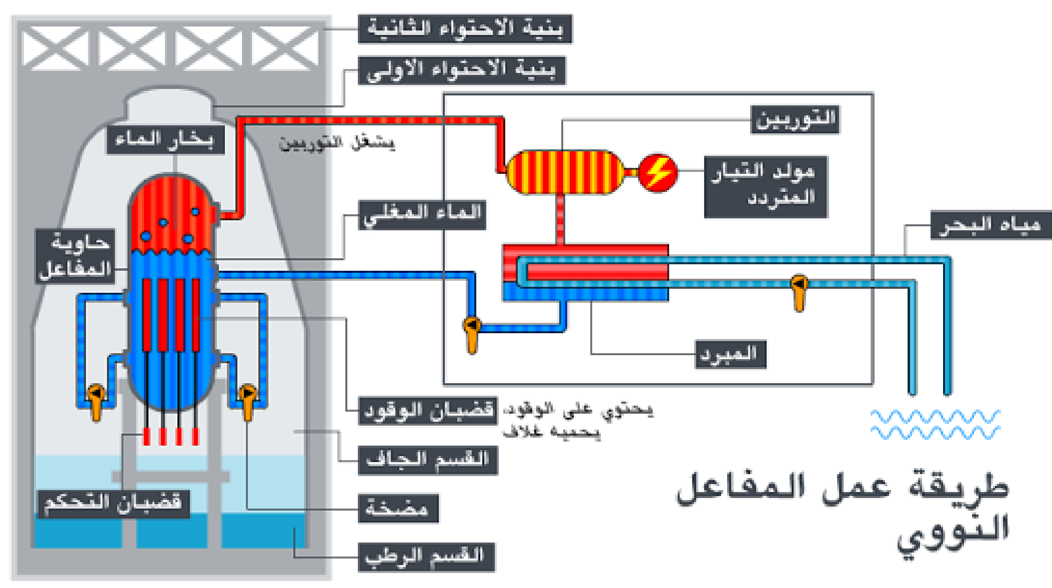


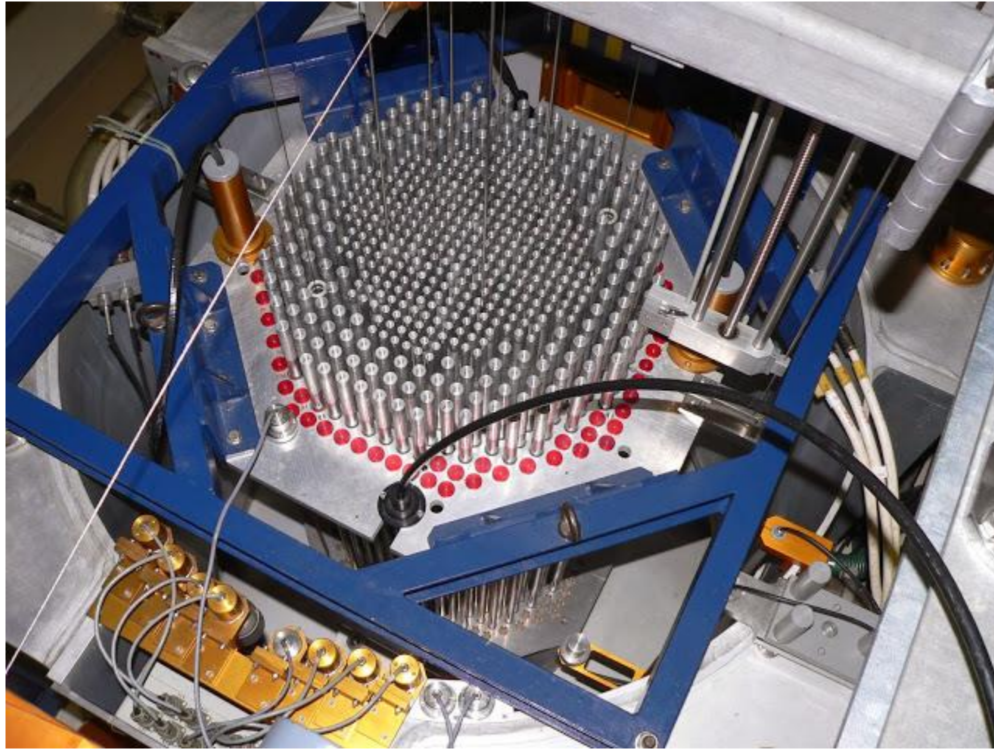
Figure 4-4

وبذلك تتحول الطاقة النووية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة حركة للتوربين والمولد الكهربائي الذي يحولها إلى طاقة كهربائية لتشغيل المصانع وإنارة المنازل.

وداخل المفاعل النووي من الداخل توجد أيضا أعمدة الوقود (شكل 4-5) ، وهي تحتوي على نسبة تخصيب 3 إلى 5 في المائة من اليورانيوم 235 . وداخل المفاعل أيضا يوجد المهدئ وهو أما الماء الخفيف أو الثقيل

ووظيفته أنه يقوم بتقليل سرعة النيوترونات لغرض الوصول إلى السرعة المطلوبة لحدوث التفاعل المتسلسل. فالنيوترونات السريعة جدا لا يمكن لها أن تنشطر نواة اليورانيوم 235.

ويتكون قضيب الوقود من أنبوبة من الفولاذ لا يتجاوز قطرها الداخلي السنتيمتر الواحد وسمكها عدة ملليمترات وبطول قد يصل إلى خمسة أمتار وتعبأ بقطع من المخصب على شكل أقراص أسطوانية صغيرة (pellets) حيث يصل وزن القضيب بعد التعبئة إلى عدة كيلوغرامات. وعادة ما يتم جمع قضبان الوقود على شكل حزم (fuel assemblies) تتألف الحزمة الواحدة ما بين 200 و 300 قضيب وقود ليسهل إدخالها وإخراجها من قلب المفاعل دفعة واحدة. ويتراوح عدد الحزم ما بين 150 و 250 حزمة أي أن المفاعل قد يحتوي على 50 إلى 150 طن من اليورانيوم الطبيعي أو المخصب. و هذه الكمية من الوقود تكفي لتشغيل المفاعل لمدة قد تصل إلى سنتين مما يعني أن تغذية المفاعل تتم كل سنة أو سنتين وعادة ما يتم إيقاف المفاعل بشكل كامل لتزويده بالوقود



صورة لقلب المفاعل تظهر فيها قضبان الوقود Figure 4-5

4.2.1 مخاطر المفاعلات

حدوث خلل فني في نظامي التهدئة والتبريد يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى 1200 درجة مئوية ، ويمكن عندها أن تنفصل جزيئات الهيدروجين عن الماء. وإذا ما تم إطلاق البخار المحمل بالهيدروجين من

المفاعل فإنه يتفاعل مع الأوكسجين في الهواء ويؤدي إلى حدوث انفجار ، مثلما حدث مؤخرا في مفاعل فوكوشيما اليابانى.

أما ارتفاع درجة الحرارة في قلب المفاعل إلى 2200 درجة مئوية فسيؤدي إلى انصهار أعمدة الوقود النووي. مثلما كان عليه الحال في مفاعل تشرنوبل الروسى.

وهناك مشكلة أخرى تكمن في كيفية التخلص من المخلفات النووية الناتجة في المفاعلات النووية. وعادة ما يوضع اليورانيوم المستهلك في أحواض مائية كبيرة لمدة عشرات السنين لغرض تخفيض إشعاعها النووي إلى حد يسهل معاملتها صناعيا بعد ذلك

علما بأن كمية النفايات المشعة نتيجة الانشطار النووي بمحطات إنتاج الكهرباء بالمفاعلات النووية محدودة مقارنة بكمية النفايات بالمحطات الحرارية التي تعمل بالطاقة الأحفورية كالنفط أو الفحم. فالنفايات النووية تصل 3 ميليجرام لكل كيلو واط ساعة (3mg/kWh) مقابل حوالي 700 جرام ثاني أكسيد الكربون لكل كيلو واط ساعة بالمحطات الحرارية العادية لكن هذه الكمية الصغيرة جدا من الإشعاع النووي قد تكون قاتلة أو قد تتسبب في عاهات وتشوهات لا علاج لها. لهذا فإن جميع الدول التي تستخدم الطاقة النووية لإنتاج الطاقة الكهربائية تعمل على التخلص من تلك النفايات المشعة بدفنها في الطبقات الجيولوجية العميقة تحت سطح الأرض بعيدا عن الناس

4.2.2 هل المفاعلات النووية يمكن أن تنفجر كالقنابل؟

لا يمكن أن ينفجر المفاعل النووي مثل القنبلة ، فمستوى تخصيب اليورانيوم منخفض جداً ، وهو أقل بكثير من عملية التخصيب المطلوبة لإنتاج الأسلحة النووية. وقد تم تصميم هذه المفاعلات لإنتاج الطاقة الكهربائية بشكل آمن وموثوق.

4.2.1 ما هو الماء الثقيل؟

كيميائيا الماء الثقيل هو نفس الماء الخفيف (العادي) ولكن الاختلاف هو في أن ذرتي الهيدروجين في الماء العادي (H_2O) تستبدل بذرتي ديوتيريوم (deuterium atoms) ويرمز له بــ.(D_2O)
الديوتيريوم هو عبارة عن نظير للهيدروجين وهو يحتوي على نيوترون إضافي ولذلك فان ذرة الديوتيريوم تتكون من بروتون ونيوترون وحيدين في نواة الذرة وإلكترون واحد يدور حولها.
إذا فالنيوترون الزائد هو الذي يجعل من الماء الثقيل ثقيلا فهو تقريبا أثقل من الماء العادي بمقدار 10%.

وفائدة الماء الثقيل – في المفاعلات الذرية – تكمن في قدرته العالية على التحكم بطاقة النيوترونات المنطلقة من التفاعل الذري. كما انه يعمل كمبرد لقلب المفاعل وينقل الحرارة بفعالية لتحويلها إلى طاقة بخارية مفيدة. ورغم قدرة الماء العادي على لعب هذه الادوار إلا أن الماء الثقيل أكثر منه سرعة وفعالية.

4.2.2 ما هو مفاعل كندو؟

مفاعل كاندو هو مفاعل نووي ينتج الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة النووية وصممته وشيدته كندا . وهو يعمل باليورانيوم الطبيعي غير المخصب مع الماء الثقيل. واسم CANDU هو اختصار للاسم الكامل Canada Deuterium Uranium reactor

يتميز الماء الثقيل بأنه ضعيف الامتصاص للنيوترونات مما يحافظ على كثافة النيوترونات في قلب المفاعل، أما الماء العادي فهو يمتص النيوترونات، ولذا كان لا بد فى مفاعلات الماء الخفيف أن يعوض المفاعل تلك النيوترونات المفقودة عن طريق زيادة نسبة اليورانيوم-235 لإبقاء معدل التفاعل على مستواه.

والفكرة هنا أن اليورانيوم الطبيعي يتكون من مخلوط لعدة نظائر ويغلب فيه اليورانيوم-238 ونسبة صغيرة من اليورانيوم-235 . ينشطر اليورانيوم-238 بالنيوترونات السريعة ذات طاقة أكبر من 1مليون إلكترون فولت . ولكن لا يمكن أن يستمر التفاعل مع اليورانيوم-238 حيث يمتص نيوترونات أكثر مما يصدره ، فلا يمكن لليورانيوم الطبيعي القيام بتفاعل تسلسلي بمفرده.
وحل هذه المشكلة يكون عن طريق تهدئة سرعة النيوترونات بحيث يرتفع إحتمال اصطدامها بأنوية اليورانيوم-235 مما يتيح الفرصة لاستمرار التفاعل في المفاعل. ولهذا نحتاج إلى مهدئ لسرعة النيوترونات، الذي يقوم بامتصاص جزءا من طاقة حركة النيوترونات فتنخفض سرعتها إلى سرعة جزيئات المهدئ نفسها. وهذا هو دور الماء الثقيل .

ملحق الفصل الرابع :
نبذة عن تاريخ القنبلة الذرية

في عام 1934 اكتشف عالم ألماني أن انشطار ذرة اليورانيوم يحدث بسرعة ، ويولد كمية هائلة من الطاقة ، ويمكن أن يحدث إنفجاراً هائلاً . أخذ الألمان بتطوير هذه الفكرة والإستفادة منها في تصنيع القنبلة النووية ، لم يسترع ذلك اهتمام أحد إلى أن قامت المانيا بإيقاف تصدير اليورانيوم من مناجم تشيكوسلوفاكيا المحتلة من قبل الألمان .

في الثاني من آب أغسطس 1939 ، وقبل بدء الحرب العالمية الثانية ، قام البرت اينشتاين Albert Einstein بكتابة رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت Franklin D . Roosevelt واصفاً فيها الطاقة الهائلة التي تنتج عن الإنشطار النووي ، ومعبراً فيها وزملاءه عن قلقهم الشديد من إمكانية تحويل المانيا النازية الإنشطار النووي إلى قنبلة نووية . (اينشتاين عالم الماني المولد ، يهودي الديانة ، وكان معارضا لاستغلال الطاقة النووية لتصنيع الأسلحة) .
عقد قادة الجيش الأمريكي العزم على امتلاك هذه التقنية مهما كلف الأمر ، فأخذوا يبحثون عن بناء يصلح كمختبر لإنتاج القنبلة النووية ، بحيث يبعد الموقع (200) ميل على الأقل عن الحدود البحرية والدولية ، ويجب أن يبعد كثيراً عن التجمعات السكانية ، لأن أي خطأ قد يكلفهم الكثير من الخسائر البشرية .
استقر رأيهم على منطقة فى أرض صحراوية في ولاية نيومكسيكو في منطقة تعرف بإسم del Jornada Muerto وتعني رحلة إلى الموت ، في مشروع عرف بإسم مشروع مانهاتن السري Manhattan Project .

عمل في هذا المشروع العديد من العلماء ، وأغلبهم من ألمانيا. لم يكن أحد من العلماء على دراية بما سيحدث بعد بدء التفاعل النووي ، أحد العلماء اعتقد أن ولاية نيومكسيكو ستختفي حينئذ من الوجود .

أخيراً وبعد سلسلة من النجاحات والفشل ، وبعد ست سنوات من بداية المشروع عام 1939 ، وبعد إنفاق أكثر من (2) بليون دولار ، أصبح العلماء جاهزون لاختبار نتائج عملهم ، وقبل شروق شمس السادس عشر من يوليو عام 1945 وفي الساعة 5:30 غطى السماء ضياء برتقالي ساطع يشبه حبة المشروم (الفطر) ، في مشهد لم يكن لأحد أن يراه من قبل ، سمع دوي الإنفجار على مسافة (150) ميل بعيداً عن الموقع ، وتحولت الرمال في موقع الإنفجار إلى زجاج أخضر من شدة الحرارة



مات روزفلت فجأة في الثاني عشر من نيسان أبريل 1945 ، وأصبح بعده هاري ترومان Harry Truman رئيساً ، وكان العديد من الأمريكيين يعتقدون أنه غير مؤهل لتولي هذا المنصب ، وبالفعل اتخذ هذا الرئيس أخطر قرار في القرن العشرين .

أصبحت الحرب شبه محسومة لصالح الحلفاء ، وأخذ اليابانيون بالقتال بشكل انتحاري . وكان الاعتقاد السائد حينئذ أن الحرب لن تحسم إلا باجتياح اليابان ، ولكن هذه المغامرة ستكلف الأمريكيين الملايين من الأرواح أو أن تحسم باستخدام القنبلة النووية .

بعض الأشخاص نصحوا الرئيس بعدم استخدام القنبلة النووية ضد اليابان ، وعلى رأسهم الجنرال دوايت أيزنهاور Dwight Eisenhower قائد قوات الحلفاء في أوروبا وذلك لسببين الأول أن اليابان كانت على وشك الإستسلام ، ولا يوجد ضرورة لضربهم بشيء مروع مثل هذا ، والثاني كرهه لأن يستخدم الحلفاء هذا السلاح لأول مرة .

أعطى الرئيس ترومان قراره باسقاط القنبلة النووية فوق مدينة هيروشيما اليابانية في أغسطس ، حتى مع عدم تأكدهم من نجاحها ، فكر الأمريكيين في إنذار اليابانيين أولاً ولكن خوفهم من نقل اليابانيين لأسرى الحرب من الحلفاء لموقع الإنفجار ولإظهار قوة الأمريكيين ولإرهاب اليابانيين والسوفييت القوة الجديدة على الساحة حالا دون ذلك .

في الساعة 2:45 من صباح يوم السادس من أغسطس ، أقلعت القاذفة B–29 محملة بقنبلة نووية من قاعدة أمريكية في جزيرة تينيان Tinian Island في غرب المحيط الهادي . وبعد ست ساعات ونصف ، وفي الساعة 8:15 صباحاً بالتوقيت الياباني ألقيت القنبلة من على ارتفاع 580 متر تقريباً فوق مركز مدينة هيروشيما ، وانفجرت بعد ذلك بدقيقة وتحدث أكبر مجزرة فى تاريخ الإنسانية.



5

محطات التوليد المائية

Hydropower Power Stations

حيث توجد المياه في أماكن بها فروق ارتفاعات كالبحيرات ومجاري الأنهار يمكن التفكير بتوليد الطاقة ، خاصة إذا كانت طبيعة الأرض التي تهطل فيها الأمطار أو تجري فيها الأنهار جبلية ومرتفعة. ففي هذه الحالات يمكن توليد الكهرباء من مساقط المياه.

أما إذا كانت مجاري الأنهار ذات انحدار خفيف فيقتضي عمل سدود في الأماكن المناسبة من مجرى النهر لتخزين المياه. وتنشأ محطات التوليد عادة بالقرب من هذه السدود كما هو الحال في مجرى نهر النيل وعلى نهر الفرات في شمال سوريا.

هذا بالإضافة إلى الشلالات الطبيعية التي تستخدم مباشرة لتوليد الكهرباء كما هو حاصل في شلالات نياجرا بين كندا والولايات المتحدة . وبصورة عامة فإن أية كمية من المياه موجودة على ارتفاع معين تحتوي على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية . وإذا سلطت كمية المياه الساقطة على تربينة مائية دارت بسرعة كبيرة وتكونت على محور التربينة طاقة ميكانيكية . وإذا ربطت التربينة مع محور المولد الكهربي تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربائية .

وفيما يلى صور جوية لأكبر سد مائى فى أمريكا (سد هوفر بولاية كولورادو) فى الأشكال من 5-1 إلى 5-3.



Figure 5-1 صور سد هوفر



Figure 5-2



Figure 5-3

5.1   محطات التوليد المائية

تتميز هذه المحطات عموما بأنها تنتج طاقة نظيفة ، وتستغرق عدة دقائق في الدخول على الشبكة ، ولها عمر افتراضي كبير ، وتكلفة التشغيل بسيطة ، ولها معدل الاستجابة على الشبكة عالي جدا (يمكن أن ترفع الإنتاج من 20MW إلى 150 MW مباشرة)

لكن يعيبها أنها تحتاج إلى تكلفة إنشاء عالية ، وأن عملها مرتبط بكمية المياه المتوفرة أمام السد ، وبالتالى فالذى يتحكم في عملها مؤثرات خارجية مثل منسوب المياه المنصرف و احتياجات وزارة الرى.

5.1.1   طريقة توليد الطاقة الكهرومائية

أي كمية ماء موجودة على ارتفاع معين تحتوى على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت الطاقة الكامنة إلى طاقة حركة وإذا سلطت على توربين مائية دارت بسرعة كبيرة وتكونت على محور التربين طاقة ميكانيكية وإذا ربطت التربين مع محور المولد الكهربي ، تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربية كما فى الشكل 5-4.

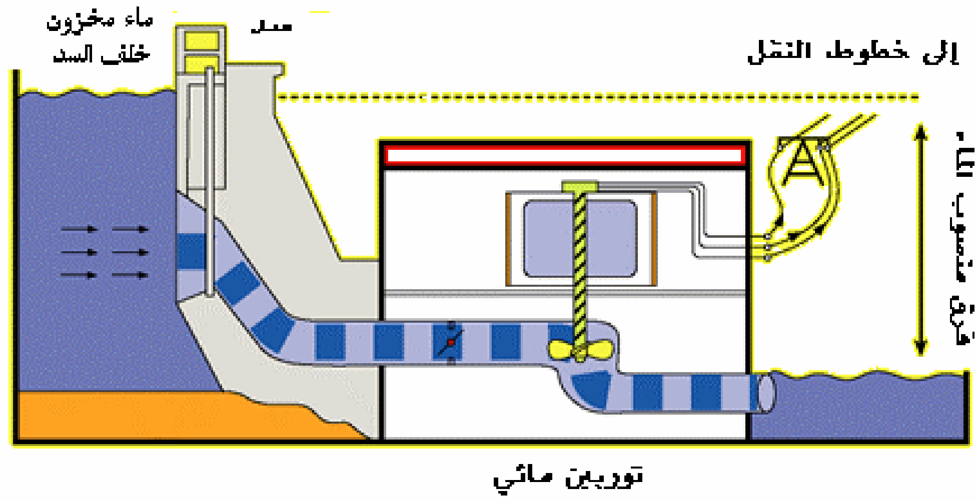


Figure 5-4 مخطط محطة توليد مائية

تتألف محطة توليد الكهرباء المائية بصورة عامة من الأجزاء الرئيسية التالية.

1. السد
2. الخزان
3. المجرى المائل: وهو عبارة عن أنبوب كبير أو أكثر من أسفل السد إلى مدخل التوربين وتسيل المياه فيها بسرعة كبيرة يوجد فيها بوابة في أولها وأخرى في أخرها للتحكم في كمية المياه المارة.
4. التوربين Turbine: تكون التربينة والمولد عادة في مكان واحد مركبين على محور رأسي واحد كما فى الشكل 5-5.
5. ويركب المولد فوق التربينة . وعندما تفتح البوابة في اسفل الأنابيب المائلة تتدفق المياه بسرعة كبيرة في تجاويف مقعرة فتدور بسرعة وتدير معها العضو الدوار في المولد حيث تتولد الطاقة الكهربية على أطراف هذا المولد .



Figure 5-5 تربينات مائية

6. أنبوب السحب Pen stoke: بعد أن تعمل المياه المتدفقة في تدوير التربين فلابد من سحبها للخارج بسرعة ويسر حتى لا تعوق الدوران.
7. المعدات و الآلات المساعدة: مثل المضخات و المفاتيح ومعدات تنظيم سرعة الدوران.

5.1.2 نظرية العمل

يبنى سد على مجرى مائي ، فيحجز الماء خلفه لتتكون بحيرة اصطناعية بسعة مائية كبيرة. وتعتمد كمية الطاقة الكهربية المولدة من المحطة على عنصرين أساسيين هما:

- ارتفاع المياه خلف المحطة (فرق المنسوب بين سطح المياه خلف السد ومنسوب التوربينات).
- معدل تدفق كمية المياه خلال التوربينات .

ويمكن حساب القدرة الكهربية كالاتى :

القدرة (وات)= الارتفاع (م) x كمية التدفق(م^3/ث) x عجلة الجاذبية (9.81 م/ث^2) x كثافة المياه (1000كجم/م^3) x كفاءة المحطة

وبالنسبة إلى الكفاءة فهي تحسب بالتقريب بنحو 85% بالنسبة لمحطات القوى المائية .

وتختلف قدرة كل سد مائي في توليد الكهرباء بحسب ارتفاع منسوب الماء فيه وكمية الماء التي تندفع في التوربين أو التوربينات وكفاءة التوربين والمولد الكهربي ، كما تقول لنا معادلة القدرة. أكبر محطة لتوليد الكهرباء من سد مائي هي 18.000 ميجاواط وتوجد في الصين الشعبية.

Example 2.8. *Water for a hydro-electric station is obtained from a reservoir with a head of 100 metres. Calculate the electrical energy generated per hour per cubic metre of water if the hydraulic efficiency be 0·86 and electrical efficiency 0·92.*

Solution.

Water head, $H = 100$ m ; discharge, $Q = 1\ m^3/sec$; $\eta_{overall} = 0{\cdot}86 \times 0{\cdot}92 = 0{\cdot}79$

Wt. of water available/sec, $W = Q \times 1000 \times 9{\cdot}81 = 9810\ N$

Power produced $= W \times H \times \eta_{overall} = 9810 \times 100 \times 0{\cdot}79$ watts

$= 775 \times 10^3$ watts $= 775$ kW

∴ Energy generated/hour $= 775 \times 1 =$ **775 kWh**

Example 2.10. *A hydro-electric power station has a reservoir of area 2·4 square kilometres and capacity $5 \times 10^6\ m^3$. The effective head of water is 100 metres. The penstock, turbine and generation efficiencies are respectively 95%, 90% and 85%.*

(i) Calculate the total electrical energy that can be generated from the power station.

(ii) If a load of 15,000 kW has been supplied for 3 hours, find the fall in reservoir level.

Solution.

(i) Wt. of water available, W = Volume of reservoir × wt. of $1m^3$ of water

$= (5 \times 10^6) \times (1000)\ \text{kg} = 5 \times 10^9 \times 9{\cdot}81$ N

Overall efficiency, $\eta_{overall} = 0{\cdot}95 \times 0{\cdot}9 \times 0{\cdot}85 = 0{\cdot}726$

Electrical energy that can be generated

$= W \times H \times \eta_{overall} = (5 \times 10^9 \times 9{\cdot}81) \times (100) \times (0{\cdot}726)$ watt-sec.

$$= \frac{(5 \times 10^9 \times 9\cdot81) \times (100) \times (0\cdot726)}{1000 \times 3600}\ \text{kWh} = \mathbf{9{,}89{,}175\ kWh}$$

(ii) Let x metres be the fall in reservoir level in 3 hours.

$$\text{Average discharge/sec} = \frac{\text{Area of reservoir} \times x}{3 \times 3600} = \frac{2\cdot4 \times 10^6 \times x}{3 \times 3600} = 222\cdot2x\ m^3$$

Wt. of water available/sec, $W = 222{\cdot}2x \times 1000 \times 9{\cdot}81 = 21{\cdot}8x \times 10^5$ N

Average power produced $= W \times H \times \eta_{overall}$

$= (21{\cdot}8x \times 10^5) \times (100) \times (0{\cdot}726)$ watts

$= 15{\cdot}84x \times 10^7$ watts $= 15{\cdot}84x \times 10^4$ kW

But kW produced $= 15{,}000$ (*given*)

∴ $15{\cdot}84x \times 10^4 = 15{,}000$

or
$$x = \frac{15{,}000}{15\cdot84 \times 10^4} = 0\cdot0947\ \text{m} = \mathbf{9.47\ cm}$$

5.1.3 ما هو الارتفاع الحرج ؟

الارتفاع الحرج هو أقصى ارتفاع لسطح المياه فى خزان السد بعده يتوقف تشغيل المحطة ، وذلك لحدوث ظاهرة التكهف (Cavitation) . و سبب حدوث ظاهرة التكهف هو أنه عند زيادة الضغط المائي فى الخزان تزيد سرعة المياه داخل التوربينات ويقل ضغط المياه (قاعدة برنولى) ، وعند هذه النقطة تتحول المياه من الحالة السائلة إلى

الحالة الغازية (غليان السائل) مكونة فقاعات غازية ، ومع زيادة سرعة التوربينات تنفجر هذه الفقاعات محدثة تآكل فى ريش التوربينات ، لذلك لابد من إيقاف التشغيل عند هذه السرعات العالية .

5.1.4 محطات الضخ والتخزين

نشير هنا إلى أن الطريقة الوحيدة المستعملة حاليا في تخزين الطاقة الكهربية ، والتي تتناسب مع الكميات الهائلة من الطاقة المخزَّنة والمسترجعة ، هي طريقة ضخ المياه إلى خزان علوي محفور بصورة طبيعية فوق جبل كما فى الشكل 5–6 ، فعند توفر فائض من الإنتاج يتم استعماله لرفع المياه بواسطة المضخات الكهربية للتخزين أعلى الجبل (تخزين فى صورة طاقة وضع) ، ثم استعمال هذه المياه المخزنة لتولد الطاقة عند ذروة الطلب ، حيث تندفع من أعلى الجبل لتصطدم بتربينات هيدروليكية لنتاج الطاقة الكهربية .

وهذه الدورة يمكن أن تكون يومية أو أسبوعية أو فصلية. وتسمى بتقنية الطاقة الكهرمائية بالضخ والتخزين Pumping Storage

وحاليا تتم دراسة تنفيذ مشروع مشابه فى جبل عتاقة بمصر

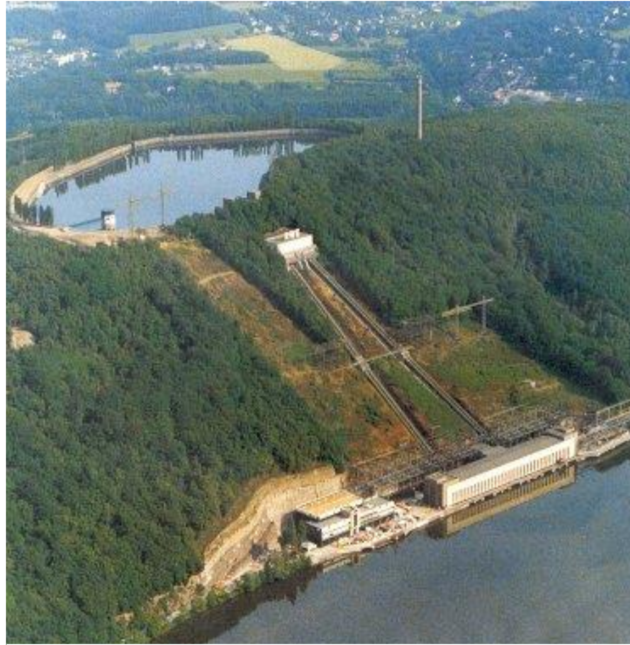


Figure 5-6 محطات الضخ والتخزين

6

محطات التوليد بالطاقة المتجددة

مع تقدم تقنيات التصنيع فى مجال محطات التوليد بالطاقة الجديدة أصبحت الأسعار متقاربة من أسعار المحطات التقليدية حيث وصل السعر فى 2015 إلى 4 سنت لكل ك وات ساعة من الخلايا الشمسية (مشروع شركة اكوابور فى محطة شمسية بدبى) ، وبلغ نفس السعر فى محطة رياح بمصر فى نفس العام 2015 (شركة EDF المنفذة لمزرعة رياح قدرة 250 ميجا وات بمصر).

هذا الانخفاض يصاحبه عدم الحاجة لمد شبكات كهربية لأن التوليد يصبح محلى ، ومع الأخذ فى الاعتبار حجم التقليل من الانبعاثات الكربونية ، وهذا ما يؤكد أهمية هذا النوع من الطاقات الذى ندرسه فى هذا الفصل.

وسيتم التركيز على خمسة أنواع كمثال فقط ، وهى:

- محطات الخلايا الكهروضوئية
- المحطات الشمسية الحرارية
- محطات الـ Geothermal
- محطات التوليد من المد والجزر
- محطات الرياح

والشكل 6-1 يبين حجم التطور الهائل فى إنتاج الطاقة الجديدة فى بعض الدول الكبرى

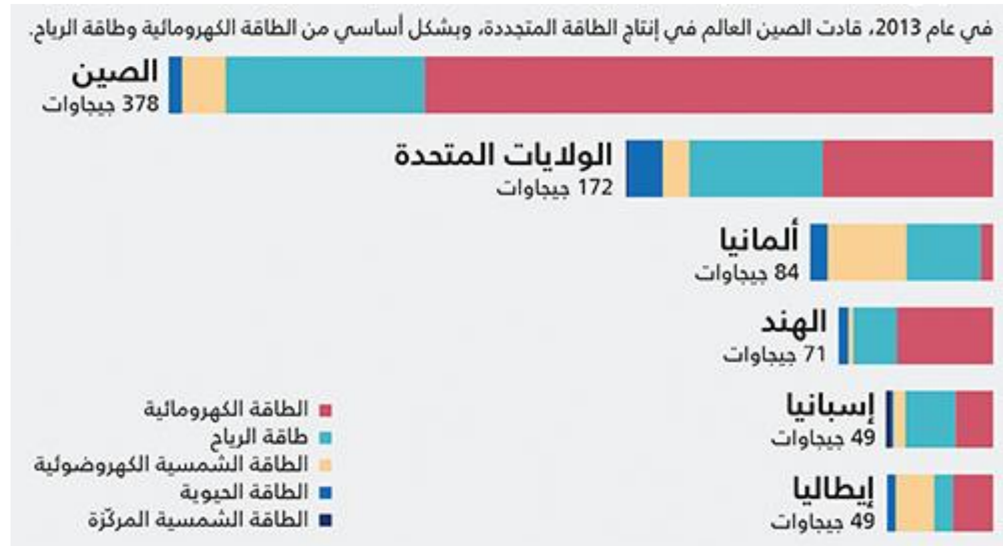

في عام 2013، قادت الصين العالم في إنتاج الطاقة المتجددة، وبشكل أساسي من الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح.
الصين
378 جيجاوات
الولايات المتحدة
172 جيجاوات
ألمانيا
84 جيجاوات
الهند
71 جيجاوات
إسبانيا
49 جيجاوات
إيطاليا
49 جيجاوات
الطاقة الكهرومائية
طاقة الرياح
الطاقة الشمسية الكهروضوئية
الطاقة الحيوية
الطاقة الشمسية المركّزة

Figure 6-1

محطات الخلايا الكهروضوئية

الشمس هي مفاعل نووي عملاق يقوم على مبدأ الاندماج النووى وليس الانشطار النووى ، فالشمس تتكون أساسا من الهيدروجين والهليوم والكربون ، ويحدث داخلها اندماج بين أنوية اثنين من ذرات الهيدروجين لتشكيل نواة الهليوم وينتج عن هذه العملية طاقة هائلة باستمرار .

والطاقة المنبعثة من الشمس لا تصل إلى الأرض بالتساوي بل تختلف حسب الوقت من اليوم ، وفقا للإمالة الموسمية من الكرة الأرضية بالنسبة للشمس ، وفقا لتوزيع المناطق المناخية على سطح الأرض ، وما إلى ذلك .

و التقديرات تشير إلى أن كل متر مربع يتلقى من الشمس مابين 1000 إلى 1300 وات .

6.1 قواعد أساسية فى الطاقة الشمسية

أشير فى المقدمة التالية إلى بعض المعلومات عن الطاقة الشمسية التى يحتاجها المتعاملون معها والتى قد تبدو للبعض غريبة فى بعض جزئياتها. وسأعرض ذلك من خلال بعض الأسئلة:

6.1.1 لماذا يكون الصيف أعلى فى درجة الحرارة؟

البعض يظن أن ذلك بسبب أن الشمس تكون أقرب للأرض فى هذا الفصل ولذا تكون الحرارة أعلى. والحقيقة أن الإجابة ليست فقط خطأ بل معكوسة. بمعنى أن الصحيح أن الشمس تكون فى الصيف أبعد عن الأرض منها الشتاء . إذن فلماذا تكون الحرارة أعلى؟

لمعرفة السبب لابد من فهم طريقة دوران الأرض حول نفسها (كل 24 ساعة مسببة ظاهرة الليل والنهار) ، وطريقة دورانها حول الشمس (كل 365 يوم وربع مسببة ظاهرة الفصول الأربعة). فالأرض أولا تدور حول نفسها ولكن محور دورانها يكون مائلا بزاوية 23 درجة تقريبا كما فى الشكل 6-2 . كما أن دورة الأرض حول الشمس تكون فى مسار إهليجى وليس دائريا . بمعنى أنها لا تدور فى دائرة لها نصف قطر ثابت ، بل تدور فى مدار له قطر أطبر من قطر .

فلو أخذنا نصف الكرة الشمالى (الذى تقع فيه كل الدول العربية) ستجد أن الصيف يحدث كما فى الشكل 6-2 حين يكون نصف الكرة الشمالى مواجها للأرض ، ولكن فى نفس الوقت حين تكون الكرة الأرضية تقع على القطر الأكبر من مسار الدوران أى عندما تكون أبعد عن الشمس. فلماذا ترتفع الحرارة ؟ هل فقط لأنها تواجه الشمس ؟ لا ، بل لأنها تواجه الشمس لمدة طويلة من اليوم ، فزيادة البعد عن الشمس يجعل منطقة التغطية أطول زمنيا كما لو أخذت ورقة وقربتها لمصباح ستجد أن ضوء المصباح يغطى مساحة معينة من الورقة ، لكن لو أبعدت الورقة ستجد أن المصباح أصبح يغطى مساحة أكبر. وهذا هو السر فى حرارة الصيف ، ليس لأن الأرض أقرب للشمس بل العكس لأن الأرض أبعد عن الشمس (وبالطبع تواجه الشمس) ولذا يكون نهار الصيف أطول وكمية الحرارة التى تصل للأرض أكبر.

لاحظ فى الصورة السابقة أن الشتاء يقع فى نصف الكرة الشمالى أيضا حين تكون الأرض على القطر الأكبر لكن الفرق هنا أن الشمس لا تواجه نصف الكرة الشمالى ولذا يكون نهار الشتاء قصيرا وكمية الحرارة أقل.

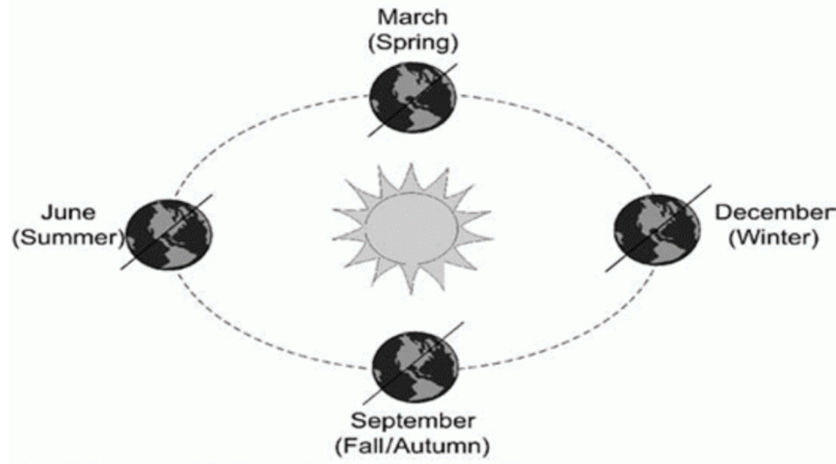


Figure 6 -2 دوران الأرض حول محورها المائل ، ودورانها فى مسار إهليجى حول الشمس

6.1.2 إلى أى جهة توجه الألواح الشمسية؟

أهم ملاحظة يجب أن تستنبطها من الشكل السابق هو أنه أيا كان مكانك فى نصف الكرة الشمالى فإن الشمس في اي فصل من فصول السنة تكون دائما مائلة ناحية الجنوب ، لذا فإن جميع الألواح الشمسية فى البلاد التى تقع فى نصف الكرة الشمالى يجب أن توجه جهة الجنوب . ويبقى السؤال التالى:

كيف أختار زاوية الميل جهة الجنوب؟

الحقيقة أنه لو كنت تعيش على خط الاستواء نفسه فإن زاوية الميل المثلى هى صفر ، بمعنى أن الألواح توضع أفقية ، ولو كنت تعيش فى أقصى طرفى الكرة الشمالى أو الجنوبى فإن أنسب زاوية هى 90 درجة. أما إذا كنت كما فى الدول العربية فإن أنسب زاوية للميل (جهة الجنوب كما ذكرنا) تتوقف على موقعك الجغرافى وتحديدا على قيمة خط العرض الذى تقع عليه.

وهذا السؤال أصعب من السؤال الأول (الجهة) ، لأن المسار الإهليجى لدوران الأرض حول الشمس يتغير زاوية ميله هو الآخر حسب الفصل كما فى الشكل 6-3.

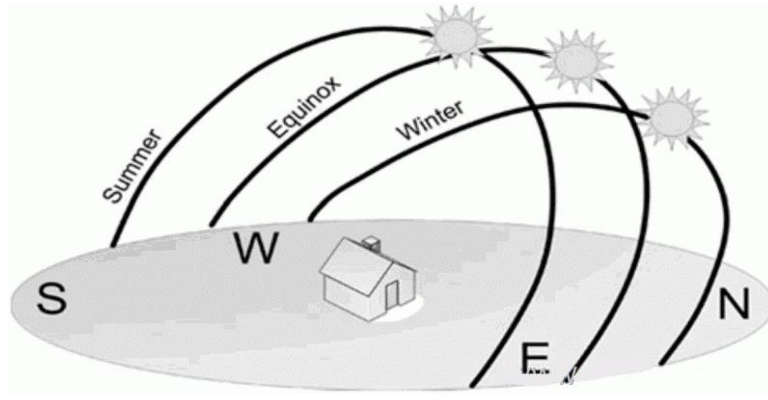


Figure 6-3 تغير مسار دوران الأرض حول الشمس حسب الفصول

وبالتالى فالإجابة ليست رقما ثابتا ، بل كل فصل له زاوية ميل مثلى. وهناك قاعدة مبسطة يمكن استخدامها فى تحديد زاوية الميل التى تحقق أعلى استفادة من الاشعاع الشمسي في كل الفصول في السنة .

وهذه القاعدة هى :

في فصل الصيف : (درجة خط العرض − 15 درجة) = زاوية الميل المثالية

في الخريف والربيع: (درجة خط العرض) = درجة الميل المثالية

في فصل الشتاء: (درجة خط العرض + 15 درجة) = درجة الميل المثالية.

والشكل 6−4 فيه خطوط العرض التى تقع عليها عواصم العالم

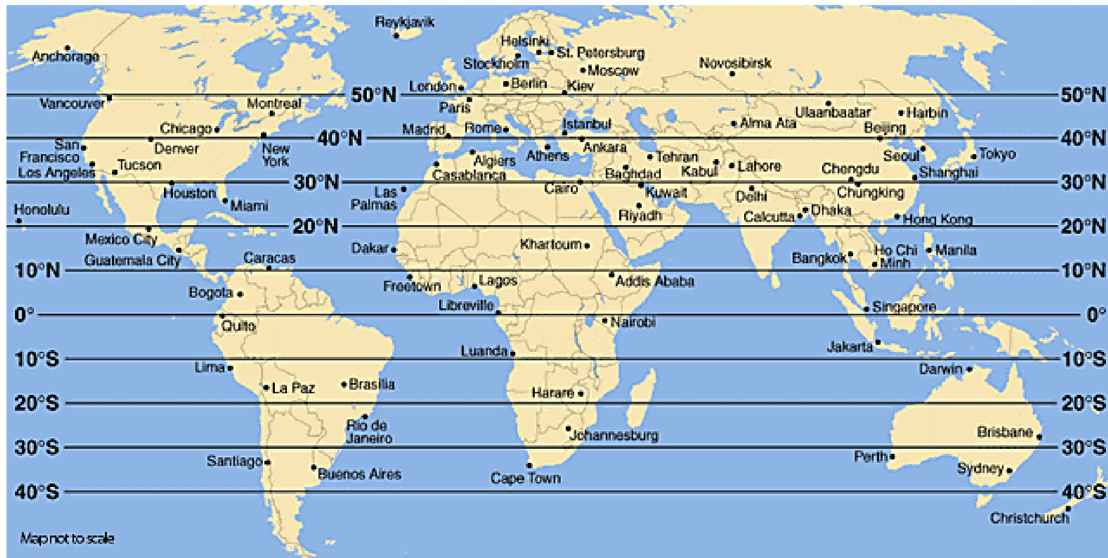


Figure 6 -4 خطوط العرض لعواصم العالم

6.2 الاستفادة من الطاقة الشمسية فى توليد الكهرباء

يتم الاستفادة من الطاقة الشمسية فى أغراض توليد الطاقة الكهربائية عبر طريقتين أو نظامين:

1- النظام الكهروضوئي: عبر استخدام الخلايا الكهرضوئية PV Cells تحويل الطاقة الضوئية الشمسية بشكل مباشر إلى كهرباء عبر تعريض هذه الخلايا للطاقة الضوئية ، ويمكن بهذه الطريقة أن نحصل على ما يقرب من 10-15% من الطاقة الساقطة على المتر المربع فى صورة كهرباء مباشرة.

2- كما يمكن استخدام نظام المركزات الشمسية وهى أنظمة تستخدام العدسات والمرايا لتركيز الأشعة الشمسية المتناثرة الحاملة للطاقة الحرارية نحو بقعة معينة ، ووفقاً لآليات متعددة و متنوعة يتم تحويل هذه الحرارة المركزة إلى طاقة كهربائية وبالتالي ففي هذا النظام يتم الحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من الطاقة الشمسية.

6.2.1 أمثلة للمحطات الكهربية الكهروضوئية

نستعرض هنا أكبر محطات الطاقة الشمسية في العالم التى تستخدم الألواح الكهروضوئية بناءً على القدرة المنتجة من كل محطة:

1- محطة ولاية أريزونا

تقع محطة (Agua Caliente Solar Project) (شكل 6-5) في مدينة يوما في ولاية أريزونا في الولايات المتحدة الأمريكية وهي إلى حد الآن أكبر محطة طاقة شمسية تعمل بتقنية الخلايا الكهروضوئية (PV Photovoltaic solar cell) وتمتد على مساحة تصل إلى 9.7 كم مربع ، و القدرة المركبة إلى الآن هي 400 ميجا وات ، وقد تم تركيب هذه المحطة من قبل شركة (First Solar) حيث تتألف هذه المحطة من 5 مليون لوح من الخلايا الشمسية الرقيقة (thin film) بقدرة تقريبية بين 75-77 واط لكل لوح .



Figure 6-5   Agua Caliente Solar Project

2- محطة شارنكا الهندية

يقع محطة (Charanka Solar Park) (شكل 6-6) في مدينة شارنكا في الهند يمتد على مساحة تصل إلى 19.8 كم مربع ، يعمل أيضا بتقنية الخلايا الكهرضوئية و القدرة المركبة فيه في نهاية عام 2014 وصلت إلى 300 ميجا وات وبتكلفة 280 مليون دولار.



Figure 6-6 Charanka Solar Park

3- محطة فى الصين

تقع محطة Huanghe Hydropower Golmud Solar Park (شكل 6-7) في صحراء جولمود في مقاطعة (Qinghai) في الصين ، تمتد على مساحة 5.64 كم مربع. كانت أكبر محطة خلايا شمسية في العالم (PV Photovoltaic solar cell) عندما تم تركيبها في 2011 وتبلغ استطاعتها 200 ميجا وات .



Figure 6-7 Huanghe Hydropower Golmud Solar Park

6.2.2 ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة

تنوع الأنظمة الكهروضوئية تبعاً للنظام الكهربائي بمعنى ربطها أو عدم ربطها بالشبكة الكهربائية ، حيث يوجد نظامان رئيسيان:

1- نظام منفرد غير مرتبط مع الشبكة stand alone or off-Grid system (شكل 6-8)

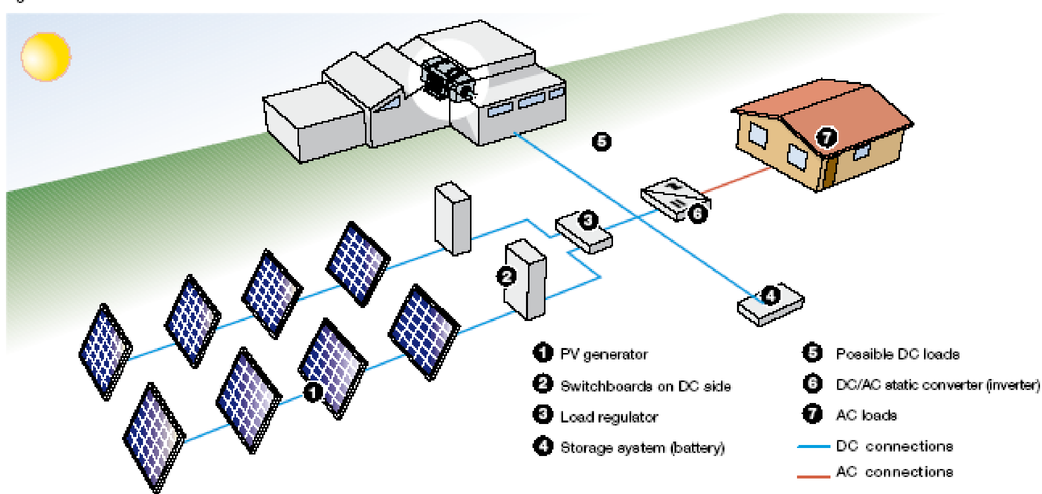


Figure 6-8

2- نظام مرتبط مع الشبكة الكهربائية Grid- connected system (شكل 6-9)

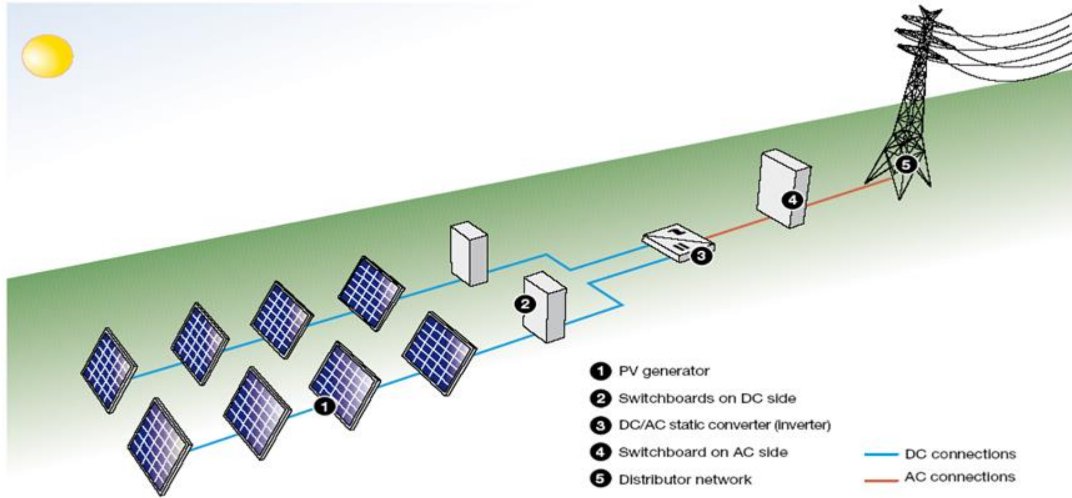


Figure 6-9

وأيضاً هذه الأنظمة نفسها من الممكن أن تحتوي على بطاريات لتخزين الطاقة وقت الحاجة إليها أثناء الليل ، أو قد لاتحتوي ، وذلك يعتمد على الغرض من إقامة النظام الكهرضوئي (تغذية منزل بالكهرباء ، توليد الكهرباء لتغذية مضخة المياه ....إلخ) ووفقاً لدراسة اقتصادية وإلى اعتبارات كثيرة. (وتفاصيل هذه الخلايا خارج نطاق هذا الكتاب).

وقد يكون هناك نظام للتتبع الشمسى Sun Tracer من أجل الحصول على Max Power وقد تكون الخلايا مثبتة على اتجاه واحد كما فى الشكل 6-10.



Figure 6-10 خلايا غير مزودة بمتتبع شمسى

المحطات الشمسية الحرارية

يمكن توليد الكهرباء باستغلال الحرارة المباشرة لأشعة الشمس ، باتباع تقنية الكهرباء الحرارية الشمسية solar thermal electricity. وهذه المحطات البخارية تقوم بتركيز أشعة الشمس فوق مساحات شاسعة بواسطة مرايا مقعرة أو عدسات لامة هائلة وتركز الأشعة الشمسية لتقع فوق مستقبلات خاصة ، بها سائل كالزيت يمتص الحرارة ويدور في الأنابيب لتسخين الماء وتحويله لبخار ، وهذا البخار يدير توربينات توليد الكهرباء .ويمكن الاستعانة في الأيام الغائمة أو بالليل بالمحروقات التقليدية كالفحم والنفط والغاز الطبيعي. ويتم بهذه الطريقة تقليل استخدام الوقود الملوث للبيئة.

6.3 الأنواع المختلفة من محطات الشمسية الحرارية

ومحطات التوليد هذه تعتمد واحدة من منظومات ثلاث مشهورة:

6.3.1 منظومة القطع المكافئ

هذا النوع يظهر فى الشكل 6-11 ، وفيها تكون مركزات شمسية سطحها العاكس على شكل قطع مكافئ ويتم تركيز الإشعاع المباشر على مستقبل حرارى طولى مركب فى بؤر المركزات لتسخين الزيت (ناقل الحرارة).
والصورة لمحطة في أسبانيا وتعتبر أول محطة في أوروبا تستخدم تقنية المركزات الشمسية parabolic trough solar thermal حيث تم بناءها في 2009 وبقدرة مركبة تقدر ب 150 ميجاوات وتمتلك هذه المحطة خزان ملح مذاب ، يتم فيه تخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن الشمس خلال النهار لتبقى المحطة عاملة حتى في ساعات عدم وجود الشمس ، وقد بلغ إنتاج هذه المحطة 540 ميجا وات ساعة سنويا.



Figure 6-11 parabolic trough solar thermal

وأول محطة فى الشرق الأوسط من هذا النوع أنشئت فى مصر (الكريمات – جيزة) (شكل 6–12) باستخدام تكنولوجيا القطع المكافئ وتصل المساحة الإجمالى ة للمركزات الشمسية إلى حوالي 220 الف متر مربع ويتم توصيلها على التوالى والتوازى للحصول على درجة الحرارة المطلوبة ، ثم ينتقل الزيت الحرارى المغلى من هذه المركزات إلى مولد البخار التقليدى بالمحطة لإنتاج بخار مشبع بضغط حوالي 20 جوى ودرجة حرارة 400 درجة ، ثم يتم نقله كما فى المحطات البخارية العادية إلى المحمصات ليتكامل مع البخار الذى أنتج فى نفس المحطة ولكن بالوقود العادى (الغاز الطبيعى) ، وبالتالي تنخفض نسبة الوقود العادى فى النهاية والأهم من ذلك انخفاض كمية الغازات المنبعثة من احتراقه.



Figure 6-12 محطة الكريمات

ويوجد أيضا في أبو ظبي محطة شمس 1 بالقرب من مدينة زايد وقد تم تشغيلها فى 2013 وهي تتألف من 258000 ، مرآة على مساحة 2.5 كيلومتر مربع بقدرة إنتاجية تبلغ 100 ميجاواط.

6.3.2 منظومة البرج المركزى

وفيها تستخدم أعداد هائلة من المرايا المسطحة الموزعة حول البرج المركزى (شكل 6–13) بحيث تنعكس الأشعة الساقطة على المرايا إلى البرج الذى يحتوى على الزيت (ناقل الحرارة).



Figure 6-13 البرج المركز

بالطبع يمكن إنتاج الكهرباء من هذه المحطات في الليل و بكفاءة عالية ، و ذلك بتخزين الفائض الحراري الكبير من الطاقة الشمسية في مادة ملحية تسمي الملح المذاب (Molten Salt) الذي يمكنه تخزين الطاقة الحرارية في خزانات و من ثم يتم إعادة استخدامها في الليل في عملية إنتاج البخار عن طريق عملية التبادل الحراري. كما يمكن إضافة الغاز أو مشتقات النفط كوقود ثانوي في حالة هبوب العواصف و الغبار و الأمطار و تسمي هذه العملية ب (Hybrid System) أى النظام المزدوج للتوليد.

6.3.3 منظومة القطع الدائرى

وفيها يتم تركيز الإشعاع الشمسى على المبادلات الحرارية فى بؤر المركزات الشمسية شكل 6-14. والمجمع Collector هو جهاز يستخدم لتحويل الطاقة الموجودة في أشعة الشمس أو الإشعاع الشمسي إلى صورة أكثر قابلية للاستخدام والتخزين .



Figure 6-14 القطع الدائرى

توليد الطاقة الكهربية من حرارة باطن الأرض

تتأثر تربة الأرض بتغيير درجة حرارة الجو اليومية على عمق 30−70 سم ، وتتأثر بتغيير حرارة الفصول على عمق 10−20 متر ، لكن يزول تأثير حرارة الشمس ابتداءا من عمق أبعد من 15−20 متر.

تزداد درجة الحرارة في باطن الأرض 3 درجات مئوية لكلّ 100 متر عُمقاً ، فإن كان متوسّط درجة حرارة السّطح 20 درجة مئوية فإننا نبلغ درجة غليان الماء (100 درجة مئوية) عند عُمق 2.7 كم تقريباً. ولو افترضنا اِطّراد الزيادة في الحرارة باطّراد العُمق لبلغنا عند عُمق 50 كم عن سطح الأرض درجة انصهار الصّخر وهي تقع ما بين 1200 - 1800 درجة مئوية.

والحرارة الكامنة فى باطن الأرض تسبب ارتفاع درجة حرارة الماء الموجود حول الصخور الأرضية إلى درجة الغليان فى بعض الأماكن وإلى درجة التبخر فى أماكن أخرى (شكل 6−15) . وبالتالي فقد تستخدم هذه المياه الساخنة مباشرة كما فى أيسلندا أو يستخدم البخار فى توليد الكهرباء أو يستخدم الماء الساخن كمرحلة أولى ضمن محطة توليد الكهرباء لتوفير الطاقة المستخدمة من الوقود الملوث للبيئة .

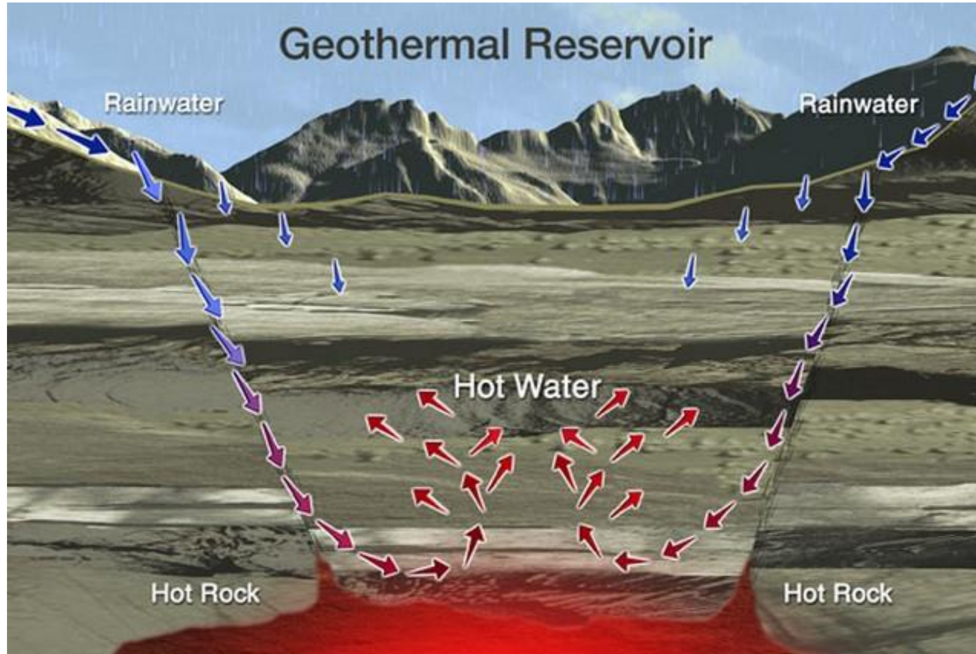


Figure 6-15 حرارة باطن الأرض

6.3.4 من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟

وفى تفسير سبب هذه الطاقة الكامنة يقول العلماء أن الأرض كانت جزءا من الشمس ، فانفصلت عنها وبردت قشرتها الأرضية بعد ملايين السنين ، ولكن بقى القلب فى حالة ذوبان وانصهار . فالأرض بشكلها الأول كانت عبارة عن كتلة نارية مشعة عملاقة ، ونتيجة لانخفاض درجة الحرارة بدأت تتشكل القشرة الأرضية التي قامت بعزل حرارة باطن الأرض مما أدى إلى حصر كل المواد المنصهرة في باطن الأرض وبسبب شدة الضغط المتولد نتيجة العزل وتكون القشرة بدأت عمليات الاندماج النووي مما ضاعف درجات الحرارة إلى حوالي 6700 درجة مئوية في مركز الأرض.

6.3.5 استخلاص الحرارة

يتم الوصول لعمق الأرض بمد أنبوب دخول لدفع الماء لأسفل يسمى أنبوب الحقن Injection Well ، وأنبوب خروج لاستقبال الماء المغلى المندفع لأعلى يسمى أنبوب الإنتاج Production Well ، حيث يتم ضخ مياه عادية عبر الأنبوب الأول إلى أسفل ، وعندما تصل المياه إلى الأسفل ونتيجة احتكاكها مع الحرارة العالية ، يتبخر الماء بشدة (حيث تبلغ الحرارة 1000 درجة) ليخرج البخار من الأنبوب الآخر مشكلاً ضغطاً هائلاً ، فيصعد البخار بقوة نحو الأعلى ، وفي نهاية الطرف الذي يصعد منه البخار ، توضع توربينات ضخمة من شأنها توليد الطاقة من ذلك البخار (شكل 6-16)

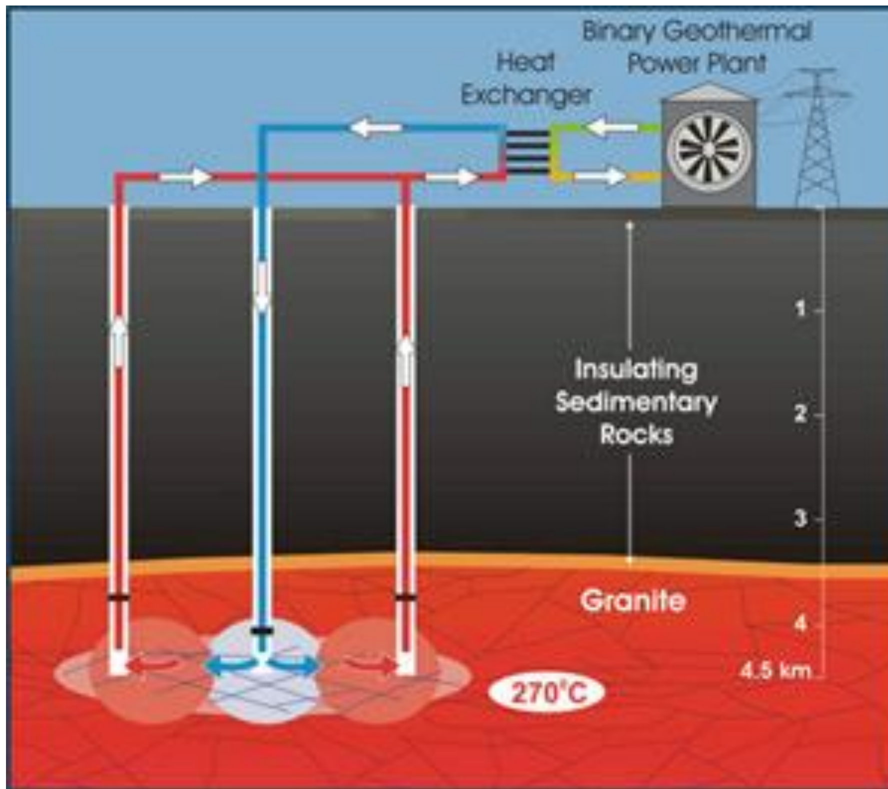


Figure 6-16 استخلاص الحرارة من باطن الأرض

6.4 أنواع أخرى من محطات الـ GEOTHERMAL

6.4.1 محطات البخار الجاف:

هذه الطريقة هي أقدم الطرق وأكثرها انتشارا ، وهي نفس الطريقة التي استخدمت في إيطاليا منذ سنة 1904م ، حيث تستخدم هذه المحطات الماء الموجود بشكل طبيعي في الطبقات الأرضية العميقة والموجود تحت تأثير ضغط وحرارة عاليين ، فيتم استخراجه بواسطة حفر آبار عميقة فيخرج على شكل بخار ماء بسبب حرارته العالية وبسبب فرق الضغط يسير هذا البخار في أنابيب ثم يصطدم بتوربينات تدير المولدات الكهربية التي تنتج الطاقة الكهربية. يضخ الماء المتكثف إلى الأرض عبر بئر آخر يسمى بئر الحقن Injection Well (شكل 6-17).

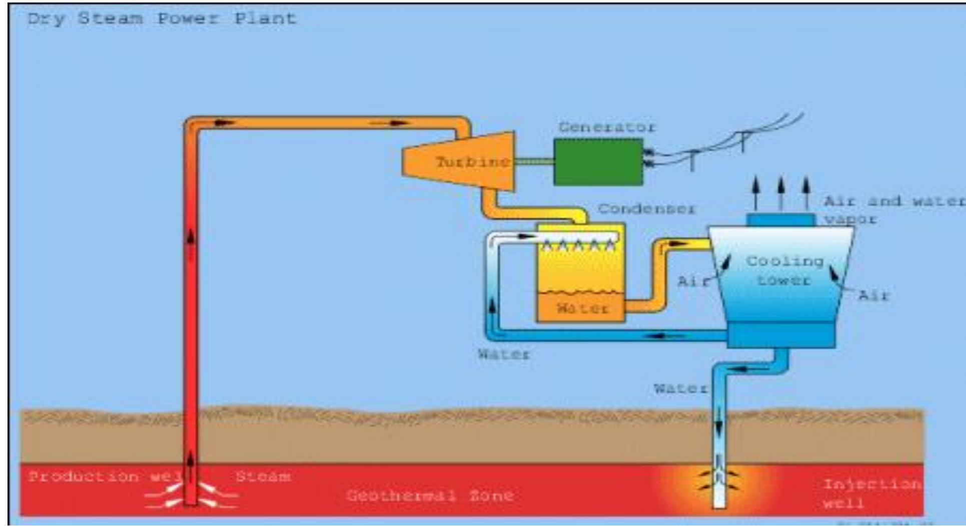


Figure 6-17 محطة بخار جاف

6.4.2 محطات الدائرة المزدوجة:

تستخدم هذه المحطات السوائل الموجودة تحت الأرض ذات درجة غليان مرتفعة (حوالي 200 مئوية) يتم ضخها إلى الأعلى حيث تقوم بتسخين الماء ذي درجة غليان عادية (100 مئوية) في أنبوب آخر يمر بمحاذاة الأنبوب الساخن (مبادل حراري). يتبخر الماء الذي تم تسخينه بسبب درجة الحرارة المرتفعة للسائل في الأنبوب الآخر . يحرك البخار توربين المولد الكهربي ويتكثف فيعود مجددا إلى محاذة الأنبوب الساخن ، ويتحرك بهذه الطريقة في دوران مستمر. يُعاد ضخ الماء المستخرج مجددا إلى الأرض عبر بئر الحقن (شكل 6-18)

لاحظ أن الأماكن المرشحة لعمل أبار مثل هذه هى فى الغالب تقع فى أماكن التنقيب عن البترول .

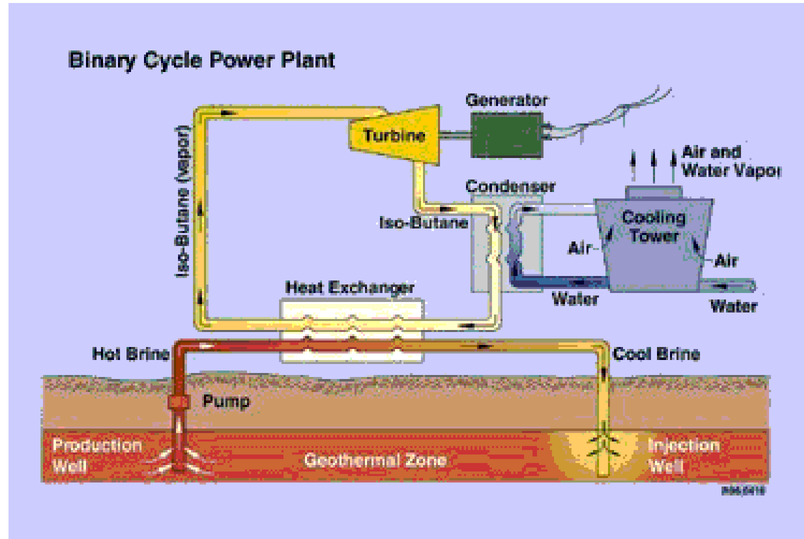


Figure 6-18 محطة دائرة مزدوجة

محطات التوليد من المد والجزر

Tidal Power Stations

المد والجزر من الظواهر الطبيعية المعروفة عند سكان سواحل البحار . فهم يرون مياه البحر ترتفع في بعض ساعات اليوم وتنخفض في الأخرى. وقد لا يعلمون أن هذا الارتفاع ناتج عن جاذبية القمر عندما يكون قريبا من هذه السواحل وأن ذلك الانخفاض يحدث عندما يكون القمر بعيدا عن هذه السواحل ، أي عندما يغيب القمر ، علما أن القمر يدور حول الأرض في مدار أهليجي أي بيضاوي الشكل دورة كل شهر هجري ، وأن الأرض تدور حول نفسها كل أربع وعشرين ساعة . فإذا ركزنا الانتباه على مكان معين ، وكان القمر ينيره في الليل ، فهذا معناه أنه قريب من ذلك المكان وأن جاذبيته قوية . لذا ترتفع مياه البحر . وبعد مضي أثنى عشرة ساعة من ذلك الوقت ، يكون القمر بالجزء المقابل قطريا ، أي بعيدا عن المكان ذاته بعدا زائدا بطول قطر الكرة الأرضية فيصبح اتجاه جاذبية القمر معاكسة وبالتالي ينخفض مستوى مياه البحر .

وأكثر بلاد العالم شعورا بالمد والجزر هو الطرف الشمالى الغربي من فرنسا حيث يعمل مد وجزر المحيط الأطلسي على سواحل شبه جزيرة برنتانيا إلى ثلاثين مترا ، وقد أنشئت هناك محطة لتوليد الطاقة الكهربية بقدرة 400 ميجاواط . حيث توضع توربينات خاصة في مجرى المد فتديرها المياه المتجه للخزان فى نصف الشهر الأول ثم تعود المياه الهابطة من الخزان وتديرها مرة أخرى. فى نصف الشهر الثانى (انظر الصورة فى نهاية هذا الجزء).

6.5 أساسيات عملية المد والجزر TIDAL POWER STATIONS

ينجم المد والجزر عن الجاذبية التي يمارسها القمر على الأرض (شكل 6-19) ، و قوة الجاذبية هذه تؤدي إلى اندفاع مياه المحيطات نحو القمر وبالتالي ارتفاع المياه بدرجة أكبر على جهة الأرض المواجهة للقمر ، و يحدث أيضا على الجانب الآخر من الأرض بنفس الطريقة ، و بين منطقتي المد هاتين ، تجد منطقة من الجزر لأن ارتفاع الماء فى منطقة يعنى بالضرورة إنخفاضه فى منطقة أخرى.

ونتيجة لدوران الأرض ، فإن مستوى البحر في أي بقعة من الكوكب يرتفع وينخفض بالتناوب مرتين في اليوم. وقوة المد والجزر هذه تقدر عالميا بثلاثة بلايين كيلو وات ، إلا أنه لا يمكن تسخير كل هذه القوة الهائلة. وهناك ما يقارب الاثنتي عشرة محطة في العالم ، قابلة لإنتاج الطاقة في العالم إلا أن صناعة هذه المحطات يحتاج إلى وجود ظاهرة ضخمة للمد والجزر. فالمستوى بين المد والجزر يجب أن يتعدى العشرة أمتار على الأقل ، أضف إلى ذلك أن المحطة يجب أن تكون بجوار (خزان) هائل ، قدر الامكان. لهذا يجب بناؤه في خليج ، أو عند مصب نهر. وفوق الحاجز أو السد الذي يفصل الخليج أو مصب النهر عن البحر تبنى محطة الطاقة.

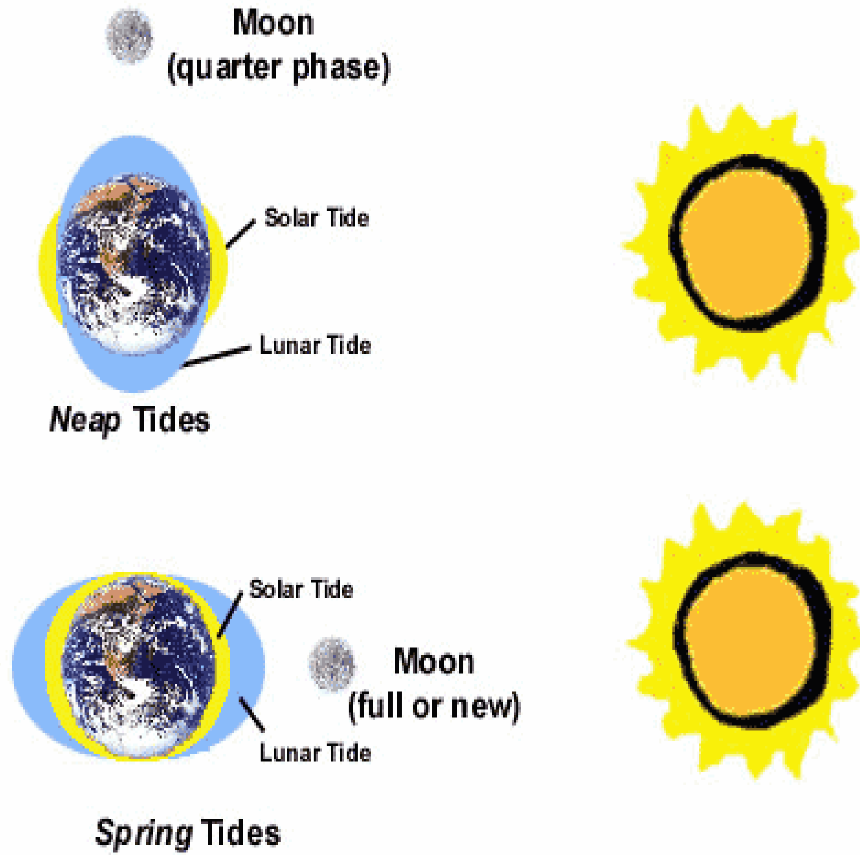


Figure 6-19 فكرة المد والجزر

ومن الأماكن التي يكثر فيها المد والجزر السواحل الشمالية للخليج العربي في منطقة الكويت حيث يصل أعلى مد إلى ارتفاع 11 مترا .

6.5.1 فكرة التوليد

كما ذكرنا فإنه يمكن تنفيذ هذه المحطات فى الأماكن التى يكون هناك فرق كبير بين المد والجذر خلال الشهر كشرط أول . أما الشرط الثانى فهو وجود مكان (مخرج) ضيق على خليج مثلا لبناء سد بين البحر والخليج الصغير الذى يمثل خزان للمياه أو ما يسمى مستوعب للمياه. والدورة تبدأ من أيام المد العالية حيث تفيض المياه إلى الخزان من خلال السد ويمكن توليد كهرباء فى هذه الفترة. ثم عندما تبدأ أيام الجزر ، وفيها يكون الماء فى الخزان أعلى منه فى المحيط ، فترجع المياه بفضل فرق الارتفاع وتتولد الكهرباء مرة أخرى. والشكل 6−20 يبين هذه الفكرة بوضوح.



Figure 6-20 محطة توليد باستخدام المد والجزر

كمية الطاقة التي يتم توليدها يعتمد كما ذكرنا على فرق ارتفاع المد والجزر ، وعلى كمية المياه التي يتم تخزينها في المستوعبات. يمكن للمضخات أن تعمل في كلا الاتجاهين. حتى أنها يمكن أن تعمل أثناء حركة المد. يمكن استخدام المضخات أيضا لرفع مستوى المياه في المستوعبات إلى ما هو أعلى من مستوى البحر. حين يكون ذلك ممكنا ، وخصوصا عندما يقل الطلب على استهلاك الطاقة ، وتحديدا في فترة الليل. يتم تفريغ المياه بعد ذلك إلى البحر ، حين يزداد الطلب على الكهرباء.

يلاحظ أيضا أن المراجع العلمية لا تسميه سدا ولكن تسميه حاجزا لكونه صغير مقارنا بالسدود المعروفة. ونشير هنا إلى أنه قد تم بناء أول محطة توليد تعتمد على المد والجزر في فرنسا حيث تم استقطاع المستوعب من البحر كما في الشكل 6–21. وبالطبع فإحدى فوائد محطات التوليد من المد والجزر أنها تنتج كميات هائلة من الطاقة دون أن تلوث البيئة.



Figure 6-21 محطة فى فرنسا

محطات الرياح

6.6 طاقة الرياح

استخدمت طاقة الرياح منذ آلاف السنين في دفع المراكب على سطح الماء وطحن الحبوب والري وفي ضخ المياه ، إلى جانب بعض التطبيقات الميكانيكية الأخرى . وتشير المراجع العلمية والمخطوطات التاريخية إلى أن الفُرس هم أول من استخدم طاقة الرياح في طحن الحبوب وضخ المياه.

ونشير هنا إلى أن سيدنا عمر بن الخطاب ﵁ قبل استشهاده بيومين على يد أبي لؤلؤة المجوسي دار بينهما حوار ، سأله عمر فيه عن طواحين الرياح فأجاب أبو لؤلؤة أنه يستطيع صنعها فطلب منه سيدنا عمر أن يصنع للمسلمين واحدة ، إلا أن أبا لؤلؤة غدر به وقتله.

أما في أوروبا فقد انتشرت طواحين الرياح "Wind Mills" منذ القرن الثاني عشر حتى وصل عددها في عام 1750 ميلادية إلى أكثر من 8000 طاحونة في هولندا وأكثر من 10000 طاحونة في إنجلترا ، كان الغرض الرئيسي لعملها هو ضخ المياه "Water Pumping" من المناطق المنخفضة إلى مناطق الزراعات المرتفعة أو إدارة أحجار "الرحى" لطحن حبوب القمح والذُرة وغيرها.

6.6.1 الطاقة الشمسية هى مصدر الرياح

تتولد الرياح نتيجة لامتصاص أسطح الأرض والبحار والمحيطات لأشعة الشمس "Solar Radiation" وبالتالي ترتفع درجة حرارة هذه الأسطح بدرجات مختلفة ، وعندما يسخن الهواء فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض كثافته ، وتبعا لذلك ينتقل الهواء من منطقة الضغط المرتفع (حيث يقل الإشعاع الشمسي) إلى منطقة الضغط المنخفض (حيث الإشعاع الشمسي الأعلى) مما يؤدي إلى نشوء الرياح.

6.6.2 كيف تعمل توربينات الرياح ؟

المكونات الرئيسية لتوربين الرياح هي ريش دوَّارة تحمل على عمود ومولد يعمل على تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربية ، فعندما تمر الرياح على الريش تخلق دفعة هواء ديناميكية تتسبب في دوران الشفرات ، وهذا الدوران يشغل المولد فينتج طاقة كهربية ، كما جهزت تلك التوربينات بجهاز تحكم في دوران الريش لتنظيم معدلات دورانها ووقف حركتها إذا لزم الأمر .

تعتمد كمية الطاقة المنتجة من توربين الرياح على سرعة الرياح وقطر الشفرات ؛ لذلك توضع التوربينات التي تستخدم لتشغيل المصانع أو للإنارة فوق أبراج ؛ لأن سرعة الرياح تزداد مع الارتفاع عن سطح الأرض ، ويتم وضع تلك التوربينات بأعداد كبيرة على مساحات واسعة من الأرض لإنتاج أكبر كمية من الكهرباء.

تنتج الولايات المتحدة وحدها سنويًّا حولي 3 بليون كيلو وات في الساعة (تلك الكمية تكفي لسد احتياجات مليون شخص من الكهرباء) ، وذلك من حقول الرياح الموجود معظمها في كاليفورنيا.

ولأن هناك بعض الأوقات التي تقل فيها سرعة الرياح ، مما يصعب معه إنتاج الطاقة الكهربية ، فإن مستخدمي طاقة الرياح يجب أن يكون لديهم مولدًا احتياطيًّا يعمل بالديزل أو بالطاقة الشمسية لاستخدامه في تلك الأوقات.

والمكان الأفضل لوضع التوربينات (عمل حقل رياح) يجب ألا يقل متوسط سرعة الرياح فيه سنويًّا عن 12 ميل في الساعة .

ومعظم مزارع الرياح تقام على اليابسة ، لكن ونظرا للتأثير المهم لسرعة الرياح على الطاقة المولدة فإن بعضا من مزارع الرياح تقام داخل المياه ويطلق عليها المزارع البحرية "Off-Shore Wind Farms" حيث ترتفع سرعات الرياح عنها في اليابسة (شكل 6-22).



جانب من مزرعة الرياح بالزعفرانة



مزرعة رياح ميدلجرندن البحرية الواقعة خارج ميناء كوبنهاجن

Figure 6-22

6.6.3 مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح

تتكون مروحة التوليد كما فى الشكل 6-23 من:

1- عدد 2 إلى 3 ريشة Rotor Blades وتصل فى الطول إلى 20 متر للريشة ، وفى الأنواع الجديدة مثل وحدة الـــ 5 ميجا يتجاوز قطر الدوران 130 متر.

2- صندوق تروس Gear Box وتربط بين :

a. محور السرعة البطيئة الذى تركب عليه الريش وهو يدور بسرعة حوالي 30 لفة فى الدقيقة
b. محور السرعة العالية وهو الذى يصل مباشرة للمولد ويدور بسرعة 1500 لفة فى الدقيقة

3- غرفة القمرة التى تسمى Nacelle ، وتشتمل على المولد والتروس فهى بمثابة Housing لكل المعدات ، وتشتمل أيضا على المعدات التى تتحكم فى الريش ، حيث يمكنها تغيير زاوية ميل الريشة بالنسبة للريح بواسطة موتور ، وبالتالي تتحكم فى سرعة الدوران التى تقاس بلفة /ثانية متأثرة بسرعة الريح والتى يجب ألا تقل عن 5 متر فى الثانية. ويجب ألا تزيد عن 30 م/ث.

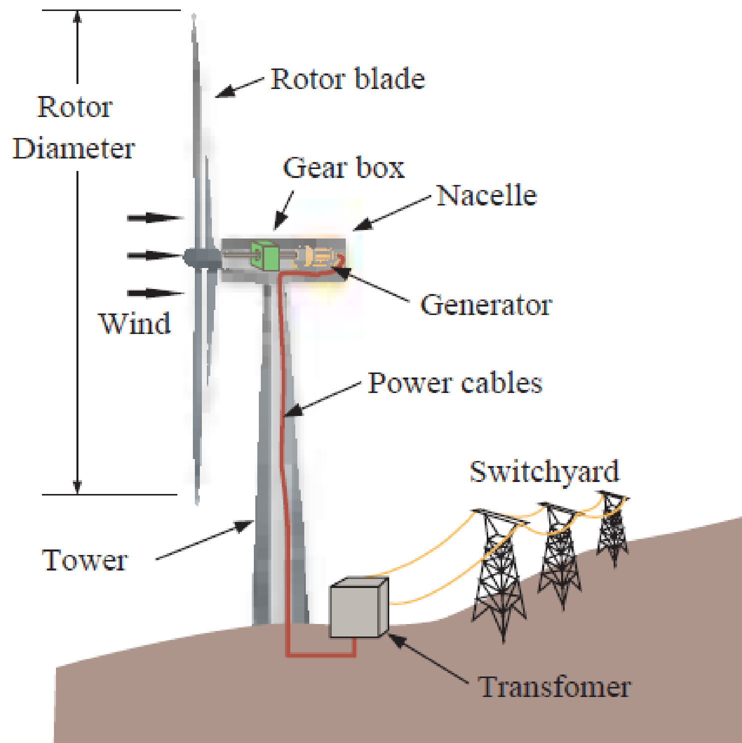


Figure 6-23 مكونات محطة الرياح

4- مولد كهربى وتتراوح قدرته من 500 إلى 1500 كيلووات وبعض المولدات وصلت الآن إلى 3 و 5 و 6 و 7 ميجا واط .

5- بعد المحول الخاص بالوحدة يتم نقل القدرة بجهد توزيع (حوالي 24 kv) عبر كابلات و يتم تجميعه مع الوحدات الاخري ثم الرفع إلى خطوط النقل و لا يتم اتصال كل وحدة مباشرة مع خطوط النقل.

6- والجميع مثبتون فى أعلى برج التوليد Tower والمصنوع من الاستيل ويبلغ ارتفاعه من 40 إلى 60 متر ، وحاليا يتجاوز الارتفاع 140 متر مع قدرات 5 ميجا. ويُصنع البرج من الحديد المعالج حراريا ليتحمل مكونات الحاوية الـ Nacelle والتي يصل وزنها إلى قرابة الثلاثين طن.

في بدء التشغيل يعتمد المولد الحثي Induction Generator على سحب تيار كهربي من الشبكة الكهربية والذي يكون ذو تردد ثابت (50 هيرتز في مصر) مع نسبة تغير طفيفة (±0.5%) ، وهو ما يعني أن التربينة تعمل في البداية كموتور حتى تصل سرعة دوران الريش إلى قيمة تختلف بحسب تصميم التربينة (مثلا 27 لفه/دقيقة) ، بعدها يترك الأمر لقوة الرياح لاستكمال تدوير التربينة وإنتاج الكهرباء.

ولضمان الاستفادة بأقصى قدر من طاقة الريح ، يستخدم نظام لتوجيه "Yawing" التربينة في اتجاه الرياح ، فإذا ارتفعت سرعة الرياح عن 25 متر/ثانية فإن الفرامل "Brakes" تمنع الريش من الدوران مخافة أن تؤدي سرعة الرياح العالية إلى تحطمها وتكسير الأجزاء الدّوارة في الحاوية "Nacelle".

6.6.4 كمية الطاقة المولدة من الرياح

تتوقف كمية الطاقة المولدة بالرياح بشكل كلى على الطاقة الحركية للهواء والتى تتناسب طرديا مع كتلة الهواء وسرعته. والمعادلة التالية تبين ذلك بدلالة مساحة المروحة وكثافة الهواء كما يلي:

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times Cp\, V^3$$

where:
P = power in watts (746 watts = 1 hp)
ρ = air density (about 1.225 kg/m^3 at sea level
A = rotor area exposed to the wind (m^2)
V = upstream wind speed in meters/sec

$$Cp = \frac{\left(1+\frac{V_0}{V}\right)\left[1-\left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2}$$

V_0 (downstream wind velocity of the exit of the rotor blades)

6.7 العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة

1- سرعة الرياح : يتأثر إنتاج توربينات الرياح تأثرا مباشرا بسرعة الرياح حيث تتناسب الطاقة المنتجة مع مكعب السرعة ، ولبيان هذه العلاقة نضرب المثال التالي ، إذا كانت سرعة الريح 5 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تعادل – تقريبا– 125 وحدة طاقة ، فإذا ارتفعت السرعة وأصبحت 6 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تزيد إلى 216 وحدة طاقة. ويبين هذا المثال البسيط كيف أن ارتفاع سرعة الريح بمقدار 1 متر/ثانية أدي إلى زيادة كبيرة في الطاقة المنتجة ، أيضا تتأثر الطاقة المنتجة من التوربينات

بعوامل أخرى منها كثافة الهواء وارتفاع البرج ومساحة سطح الدوران وتأثير التوربينات على بعضها البعض "Wake Effect" ، إلا أن التأثر المباشر يكون مع سرعة الرياح.

2- مساحة سطح الدوران "Swept Area": تعبر مساحة سطح الدوران عن المساحة الناشئة عن دوران الريش والتي تتحدد بطول الريشة وبالتالي حجم الهواء الذي يضرب مستوي الدوران ، ويطلق أيضا على مساحة سطح الدوران قطر التربينة.

3- نسبة سرعة سن الريشة "Tip-Speed Ratio":هي النسبة بين السرعة عند نهاية الريشة "سن الريشة "Tip Blade وسرعة الريح ، والتي تزيد كلما زاد طول الريشة ، وتتحدد حدودها المثلي بين 60 – 80.

6.7.1 تشغيل تربينة الرياح:

عندما تهب الرياح على التربينة يدور الـ Rotor تبعا للقوى الايروديناميكية و يتم نقل هذه الحركة إلى المولد عن طريق محورين و صندوق تروس سرعة (محور السرعة البطيئة ومحور السرعة العالية) ونسبة النقل لصندوق التروس تحدد السرعة التي سوف تصل للمولد.

الشكل 6-24 يوضح معظم مكونات تربينة الرياح في القمرة وفيها أيضا محركات السيرفو التي تقوم بتغيير جهة الريش تبعا للرياح التي تهب على التربينة.

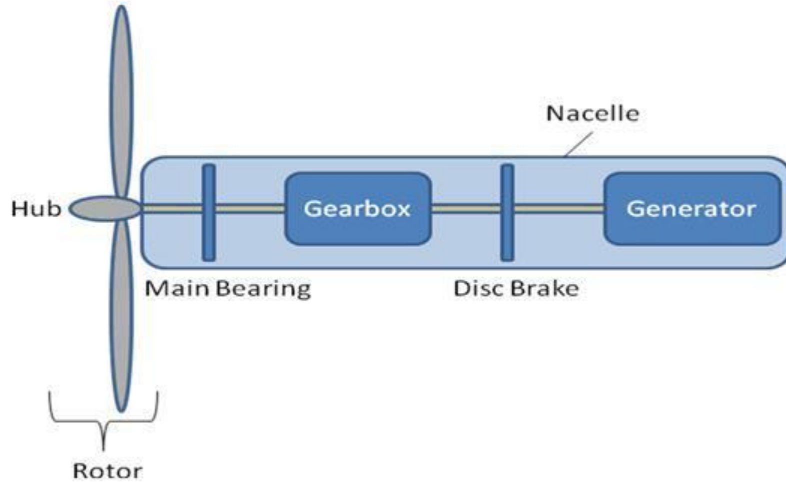


Figure 6-24 قمرة التربينة

6.7.2 زاوية الهجوم:

مساحة السطح التي تهب عليها الرياح هي أحد المؤشرات الهامة لزيادة القوة الايروديناميكية على ريش التربينة . لذلك فإن الزاوية التي يتم تغيير الريش لمواجهة الرياح عليها هي زاوية مهمة جدا و تدعى زاوية الهجوم α .

وزاوية الهجوم الحرجة تعرف بأنها الزاوية التي لايمر عندها أي تيار هوائي على الشفرات ، ويوضح الشكل 6-25 زاوية الهجوم ، وزاوية الهجوم الحرجة.

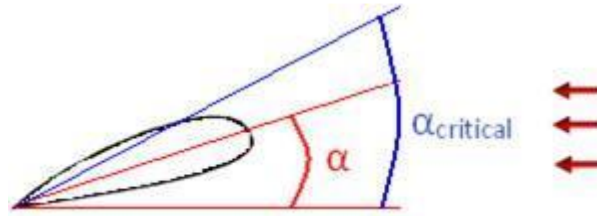


Figure 6-25 زوايا الهجوم

6.7.3 منحني القدرة :

يوضح هذا المنحني (شكل 6-26) العلاقة بين القدرة المنتجة من التربينة وسرعة الرياح ، وهو محدد رئيسي لتحديد نوع التحكم المطلوب استخدامه في التربينة.

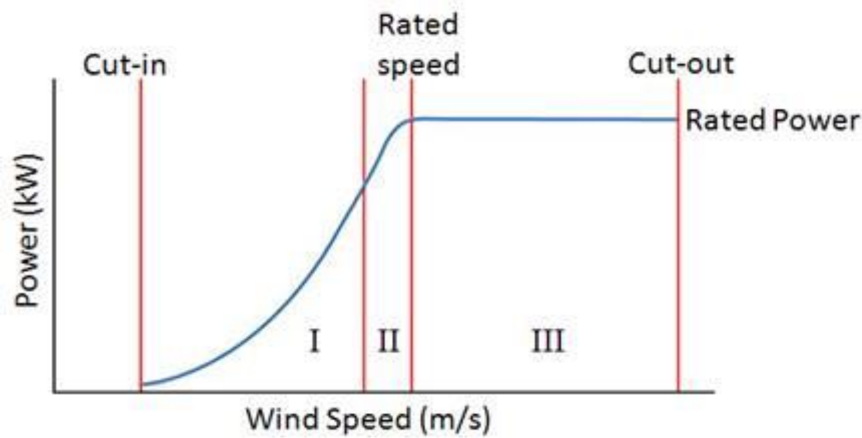


Figure 6-26 cut-in and cut-off speed

يوضح الشكل السابق منطقة تشغيل التربينة بين الـ Cut in Speed و الـ Cut out Speed و في هذه المنطقة يكون تشغيل التربينة ضمن الحدود التي تسمح بها قدرتها و تبقيها في حدود أمان التشغيل وتساعد في الحفاظ على بنيتها .

في المنطقة الأولى و الثانية و عندما تكون سرعات الرياح قليلة يتم تعديل الريش للحصول على أعظم قدرة ، أما في المنطقة الثالثة و عندما تكون السرعات عالية و فوق سرعة الرياح الاسمية المصممة عليها التربينة يتم تعديل الريش لتقليل تأثير سرعة الرياح و الحفاظ على التربينة من السرعات العالية.

6.7.4 مميزاتها وعيوبها :

- طاقة الرياح طاقة محلية متجددة ولا ينتج عنها غازات أو ملوثات ، وبالتالي فإن تأثيرها الضار بالبيئة طفيف .
- 95% من الأراضي المستخدمة كحقول للرياح يمكن استخدامها في أغراض أخرى مثل الزراعة أو الرعي ، كما يمكن وضع التوربينات – الصغيرة بالطبع – فوق المباني .
- التأثير البصري لدوران التوربينات والضوضاء الصادرة عنها قد تزعج الأشخاص القاطنين بجوار حقول الرياح ، ولتقليل هذه التأثيرات يفضل إنشاء حقول الرياح في مناطق بعيدة عن المناطق السكنية .
- تتسبب التوربينات العملاقة أحيانا في قتل بعض الطيور خاصة أثناء فترات هجرتهم ، ويتم حاليا دراسة تأثيرها على انقراض بعض أنواع الطيور ، ولكن النتائج المبدئية تشير إلى أن التوربينات ليس لها هذا التأثير الشديد .
- **ومن أبرز مشاكل محطات الرياح** مشكلة الضوضاء وقد تم التغلب عليها بتحسين تصاميم الريش لتقليل الضوضاء .
- ومن المشاكل أيضا الصدأ والتآكل ويعالج ذلك بطلاء الريش بمادة خاصة لمنع الصدأ.

6.7.5 ترتيب التربينات فى مزارع الرياح

للحصول على هندسة معقولة للمزرعة يجب أن تكون الأبعاد بين صفوف التربينات (5–9 D) ، وذلك باتجاه الرياح السائدة و(3–5 D) بالاتجاه المعامد لاتجاه الرياح ، حيث D ترمز للقطر Diameter الخاص بالشفرات كما يبين الشكل 6–27.

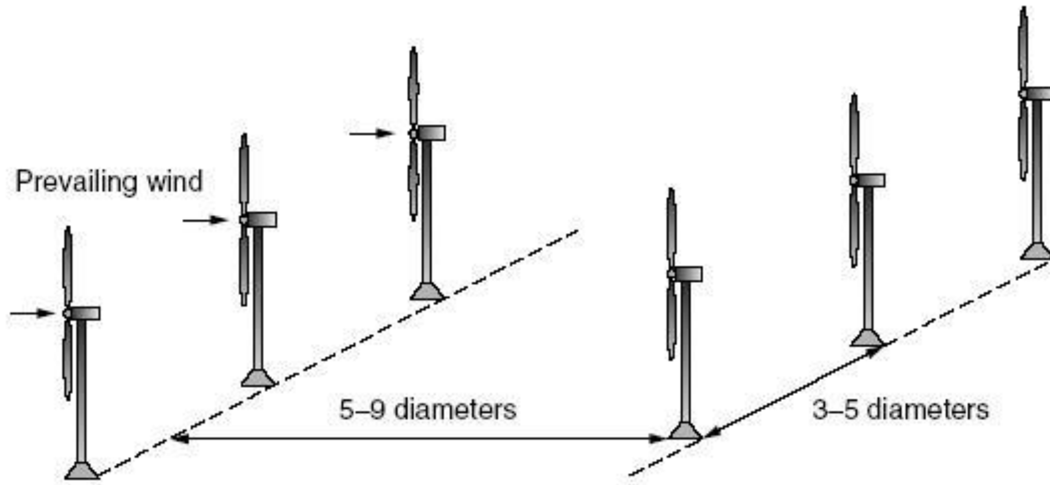


Figure 6-27 أبعاد توزيع التربينات

وغالبا ما تتوضع التربينات على مسافة 5D في اتجاه الرياح السائدة (بين الصفوف) وعلى مسافة 3D في الاتجاه المعامد للرياح (بين التربينات). في هذه الحالة نميز نوعين من التوزيع:

1- التوزيع الطبيعي Natural distribution

وفيه يتم توزيع التربينات وراء بعضها بالترتيب كما في الشكل 6-28 :

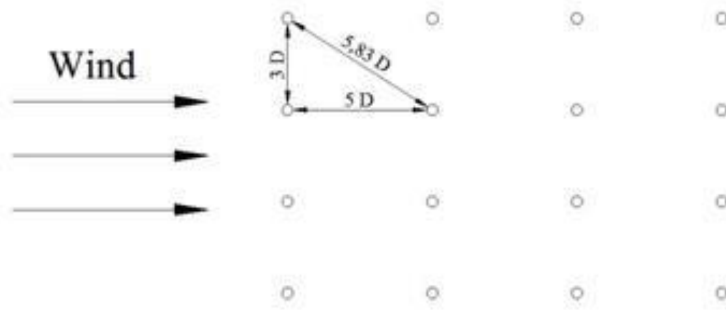


Figure 6-28

التوزيع الطبيعي للتربينات

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التربينات باتجاه الريح 5D ، والمسافة بين التربينات بالاتجاه المعامد للريح 3D ، وتكون مساحة الأرض اللازمة للتربينة الواحدة 5D*3D.

2) التوزيع الشطرنجي

وفيه يتم توزيع التربينات بالتناوب كرقعة الشطرنج فتكون مثلا الأبعاد بين الصفوف 5D كما في الشكل 6-29:

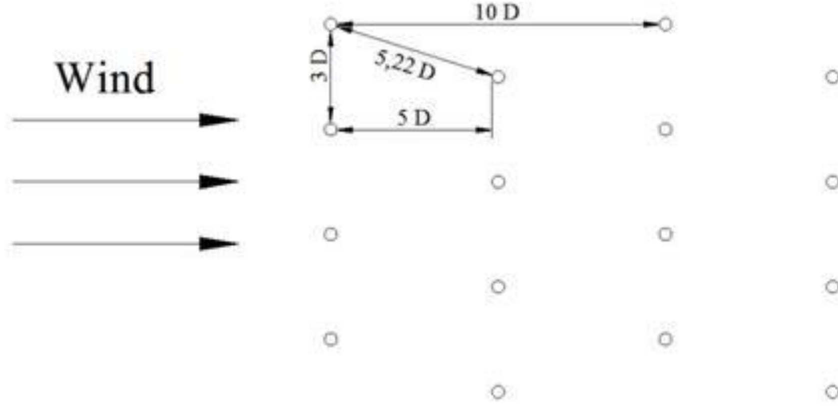


Figure 6-29

التوزيع الشطرنجي للتربينات

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التربينات باتجاه الريح 5D ، و تكون المسافة بين تربينتين متتاليتين 10D ، والمسافة بين التربينات بالاتجاه المتعامد للريح 3D. في هذه الحالة تتضاعف المسافة بين التربينات باتجاه الرياح بنفس مساحة الأرض اللازمة.

6.8 طـــاقة الرياح في مصـــــر

- تتميز مصر بنشاط رياح ثابت نسبياً و معدل سرعة يصل إلى (10 أمتار فى الثانية) و ذلك فى منطقة خليج السويس و ساحل البحر الأحمر بين رأس غارب و سفاجا ، و فى منطقة شرق العوينات.
- وبصفة عامة تكون سرعات الرياح في شهور الصيف أعلي منها في شهور الشتاء في تلك المناطق ، ويصل المتوسط السنوي لسرعة الرياح بالزعفرانة حوالي 9 متر/ثانية على ارتفاع 25 متر ، في حين أنها تصل إلى 10.5 متر/ثانية في خليج الزيت عند نفس الارتفاع.
- تم إنشاء محطات رياح لتوليد الكهرباء بالغردقة و الزعفرانة ، ، توفر استهلاكاً من الوقود البترولى يصل إلى حوالي 125 ألف طن بترول متكافئ سنوياً الأمر الذى ينعكس ايجابياً على اقتصاديات مشروعات الطاقة المتجددة.
- فى 2014 تم تشغيل مشروع طاقة الرياح فى منطقة جبل الزيت بقدرة 200 ميجا وات
- في مارس 2003 صدر أطلس رياح تفصيلي (جزء منه فى الشكل 6-30) لخليج السويس بالتعاون مع معامل ريزو الدنماركية ، وفي فبراير 2006 صدر أطلس رياح جمهورية مصر العربية. وقد بلغت القدرة المركبة الإجمالى ة فى 2014 حوالي 500 ميجاوات ، ومن المتوقع الوصول بإجمالى طاقة الرياح إلى نحو 12% من الطاقة الكهربية المولدة عام 2020.

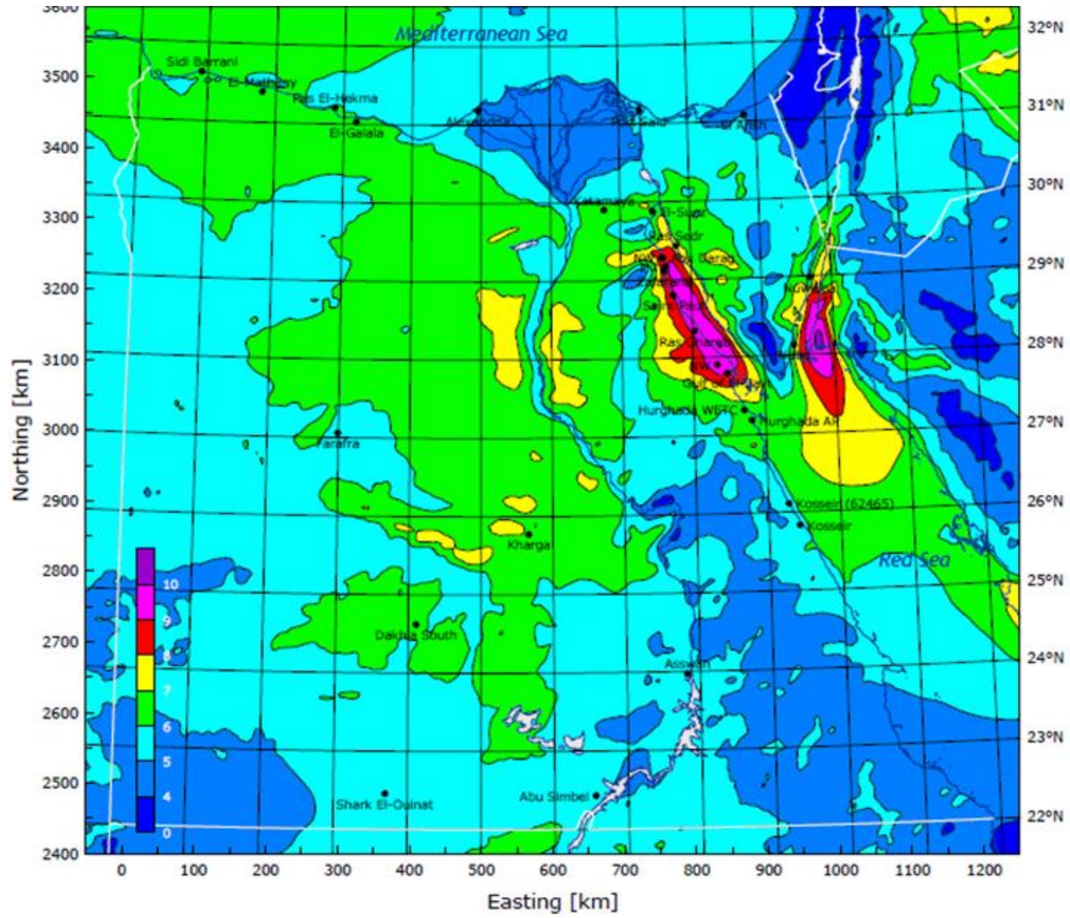


Figure 6-30 أطلس الرياح فى مصر

6.9 محطات الرياح في البحار والمحيطات



Figure 6-31 off-shore wind station

الرياح البحرية تميل للتدفق بسرعة وقوة أكبر من الرياح على اليابسة ، ذلك لأن خشونة سطح البحر أقل منها عند اليابسة وعوائق هبوب الرياح أقل وبالتالي فإن ذلك يسمح للتربينات الرياح بتوليد طاقة كهربائية بشكل أكبر.

وبما أن الطاقة المستخرجة من الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح ، فإن أي زيادة بسيطة في سرعة الرياح يمكنها أن تحقق زيادة ملحوظة في الطاقة الكهربية المتولدة ، على سبيل المثال تربينة الرياح المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 16 ميل بالساعة (7 متر بالثانية) تنتج أكثر ب 50% من نفس تربينة المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 14ميل بالساعة (6 م بالثانية)

ميزات وضع تربينات الرياح في البحر :

انخفاض نسبة الضجيج الصوتي: أن تربينات الرياح خلال عملها تعمل على بعث صوت مزعج والذي أدى إلى التسبب بمشاكل للناس الذين يسكنون في المناطق المجاورة للمحطة الرياح ، حتى أن بعض المزارعين يشتكون بأن مواشيهم تتأثر بالضجيج الصادر عن شفرات تربينة الرياح ، لذلك تواجد تربينات الرياح في البحر (شكل 6−31) يخفف من تأثير هذه المشكلة سواء على الإنسان أو الحيوانات التي تعيش في المناطق المجاورة.

1− لا تشكل تهديد على حياة الطيور المهاجرة: تربينات الرياح المتواجدة على ارض اليابسة غالبأ ما تسبب مقتل العديد من الطيور المصطدمة بشفراتها المتحركة ، على الرغم من أن هذه المشكلة تعمل بعض

الدول التي تعتمد على طاقة الرياح على تفاديها بعدم إنشاء محطات ريح على طريق هجرة الطيور ، وتربينات الرياح في البحار تنهي هذه المشكلة حيث أن الطيور نادرا ما تطير فوق المحيطات.

2- لا يوجد لتربينات الرياح تأثير بصري كبير حيث أنها توضع بعيدة عن أماكن السكن ، فهي لا تؤثر على المنظر العام.

السلبية الوحيدة لتربينات الرياح في البحار بالنسبة للتربينات على اليابسة هو التكلفة ، حيث من الممكن أن تزيد كلفة الطاقة المولدة عن هذه تربينات بحوالي (2.5 إلى 3.5 مرة) عن تلك المتواجدة على اليابسة ولكن على أية حال مازالت تربينات الرياح في البحار صناعة قيد التطوير وهذه التكلفة العالية ستنخفض مع الزمن ، علما بأن التكلفة العالية بسبب ظروف العمل الصعبة لتركيب وصيانة تربينات في البحار والتي تتطلب الاستعانة بسفن خاصة لتركيبها في مياه البحر.

أسطورة المولدات من النوع Free Energy

اختم هذا الفصل بالتعليق على المولدات الموجودة على الإنترنت والتى تسمى Free energy generator وملخصها أنها تتكون من Rotor + Stator كما فى المولدات العادية لكنها هنا لا تحتوى على ملفات بل تحتوى على أقطاب مغناطيسية من النوع Permenent magnet بحيث تركب كمية ضخمة منها على الـ Rotor وكمية أخرى ضخمة على الـ Stator ويكون دائما الأقطاب المتواجهة فى الـ Rotor and stator داخل الـ Air gap متشابهة (شمالى يواجه شمالى أو جنوبى يواجه جنوبى) ، وتبدأ القصة فى الفيديو بأن يدار هذا المولد يدويا أولا ، ثم يترك بدون توصيله بأى مصدر خارجى وتجده فعلا يستمر فى الدوران (بفعل التنافر بين الأقطاب) .

والحقيقة أن هذه الطاقة الحركية لا يمكن أن تستمر سوى دقائق (تطول أو تقصر حسب حجم الأقطاب) ، ولما كانت الأقطاب المستخدمة ضخمة فإنها يمكن أن تستمر بفعل القصور الذاتى لمدة طويلة عشرين دقيقة مثلا ، ويمكن خلال هذه المدة توليد طاقة كهربية كافية لتضئ بعض اللمبات الموفرة كما فى الفيديو أو سخان صغير ، ولكن لا يمكن أن تستمر أكثر من ذلك كما لا يمكن أن تغذى حملا كبيرا ولذا تجد هذه الفيديوهات لا تتعدى دقائق.

Appendix A
إقتصاديات محطات التوليد

هذا الملحق يمثل الختام الطبيعى لأى حديث عن محطات التوليد ، ففى الفصول السابقة تناولنا فنيات عديدة لمحطات التوليد بأنواعها المختلفة ، لكن الواقع العملى يحكم بأن الفنيات وحدها ليست الفيصل فى اختيار نوع المحطة التى نود إنشاؤها ، وربما كانت إقتصاديات محطات التوليد هى الفيصل فى الاختيار بين أنواع عديدة من المحطات.

وفى هذا الملحق سنتناول بعض المصطلحات الاقتصادية التى تخدم الموضوع ، ثم نشرح العوامل المؤثرة على اقتصاديات محطات التوليد ، ونختم الفصل بمقارنة بين أسعار المحطات طبقا لما أعلنته وزارة الطاقة الأمريكية فى إصدار سنة 2013.

ملحوظة:
سيلاحظ القارئ أنى أرجع كثيرا لإحصائيات أمريكية فى هذا الملحق وغيره من الفصول ، والسبب أن الوزارات هناك تطبق مبدأ الشفافية حرفيا ، فلا يوجد أسرار تخفى عن الناس بخصوص أسعار المحطات أو عن الشركات المنفذة ، ولا كم حصلت إلخ . ويمكن للقارئ الرجوع لهذه التقارير ليعرف حجم الشفافية الموجودة فى هذه البلاد.!!!

العوامل المؤثرة فى اقتصاديات المحطات

عند بناء محطة توليد ، فإن هناك العديد من الاعتبارات الفنية والاقتصادية التى تؤثر فى تصميم المحطة . وما يهمنا هنا هو الاعتبارات المؤثرة إقتصاديا ، ومنها:

4- موقع المحطة (سعر الأرض يختلف من مكان لآخر)
5- تواجد عمالة تسكن بالقرب من مكان المحطة ، وإلا ستأخذ فى الاعتبار تكلفة إعاشة العمال ومواصلاتهم (فى البلاد المتقدمة) .
6- تكلفة الإنشاء والتصميم
7- مصاريف التشغيل والصيانة
8- تكلفة إنتاج الـ kWh من المحطة
9- تكلفة خدمة الدين إذا كانت منشأة بقرض من البنوك

وعموما يمكن تقسيم المصروفات فى المحطات إلى نوعين :

1- **مصروفات ثابتة :** تشمل تكلفة الإنشاء وفوائد قرض الإنشاء ، والتأمين والضرائب التى تفرضها الدولة على عائدات بيع إنتاج المحطة إذا كانت قطاعا خاصا. أما إذا كانت المحطة ملكا للدولة فإن الضرائب يدفعها المستهلكون لهذه الكهرباء ، بمعنى أن يضاف للتعريفة الاستهلاك نسبة أخرى للضرائب.

علما بأن تكلفة الإنشاء تشمل ثمن الأرض والمبانى وثمن المعدات ، ومصاريف تركيب المعدات ، ومصاريف التصميم والتخطيط إلخ .

ويضاف أيضا تكلفة المخازن ، والحراسة ، فالمحطة تحتاج لمخازن ضخمة لتخزين الوقود وزيوت التشحيم وقطع الغيار إلخ لأن هذه الأشياء يجب أن تكون حاضرة دائما تحسبا لأى صيانة علاجية محتملة.

2- **مصروفات جارية** (وهى متغيرة حسب حجم الإنتاج ، وتشمل تكلفة الوقود والأجور وتكلفة الصيانة ومستلزمات الإنتاج).

وتعتبر تكلفة الوقود هى الأكثر تأثيرا فى محطات الكهرباء (باستثناء المحطات المائية والتى هى الأقل فى مصاريف التشغيل ، وحتى مصاريف العمالة تعتبر هى أيضا الأقل فى المحطات المائية مقارنة بالمحطات البخارية مثلا التى تحتاج عمالة أكثر بكثير) . وتتوقف تكلفة الوقود على كمية الإنتاج وسعر الوقود وكفاءة المحطة. ودائما يجب البحث عن أفضل طرق تقليل استهلاك الوقود بالمحطة.

وفى المحطات البخارية مثلا يكون توزيع نسب التكلفة بين العناصر السابقة فى حدود النسب التالية:

Fuel cost =	30 to 40%
Fixed charges for the plant =	50 to 60%
Operation and maintenance cost =	5 to 10%

Rate of Interst معدل الفائدة

قد يكون بناء المحطة بواسطة قرض من بنك أو بواسطة استثمارات من شركات أو مجموعة أفراد ، فى كل الأحوال فصاحب المال يريد استرجاع ماله ، مضافا إليه مكسب معتبر ، وهو ما نسميه الفائدة ، والتى تساوى الفرق بين المبلغ الأصلى والمبلغ المسترد ، وقد تكون هذه الفائدة محسوبة على أنها فائدة بسيطة ، بمعنى أنها نسبة ثابتة سنويا . وقد تكون فائدة مركبة تتغير قيمتها مع طول المدة.

على سبيل المثال فأنت إذا أودعت 1000 دولار بالبنك بفائدة بسيطة قدرها 3% لمدة 5 سنوات فهذا يعنى أنك ستحصل على 150 دولار كفائدة فى نهاية الخمس سنوات (مبلغ الفائدة يوضع سنويا فى حساب منفصل وتظل الوديعة قيمتها ثابتة عند 1000 دولار) . أما إذا كانت فائدة مركبة فإن العائد (الفائدة) تضاف إلى أصل المبلغ وبالتالى تكون الفائدة (العائد) فى نهاية السنة الثالثة مثلا أعلى من العائد فى نهاية السنة الثانية وهكذا.

معدل الإهلاك Depreciation

إذا كنت تريد إنشاء مشروعا (محطة توليد مثلا) فإنك لا تتوقع فقط أن يحقق ربحا (ناتجا عن بيع الكهرباء المولدة) يغطى مصاريف التشغيل وقدر معين من الأرباح فقط ، لكنك يجب أن تأخذ فى الاعتبار أن معدات هذا المشروع تتآكل سنويا بفعل التشغيل أو العوامل الجوية أو حتى مجرد التقادم ، ومن ثم لابد من تقدير نسبة معينة لمعدل الإهلاك تضاف إلى العائد المتوقع وتصرف فى تجديد معدات المشروع ، وإذا لم يحقق المشروع عائده المتوقع ومضافا إليه معدل الإهلاك فلن يستطيع أن يحقق نفس الأرباح سنويا بسبب تقادم معداته.

ومعدل الإهلاك غالبا لا يكون ثابتا بل متزايد مع تقادم العمر ، وقد يكون التزايد خطيا أو غير خطى ، وعموما هناك عدة طرق لحساب هذا المعامل يمكن الرجوع إليها فى مصادرها.

تسعير الكهرباء المباعة Tariff

بناء على دراسة جميع عناصر التكلفة السابقة يمكن الآن تحديد تعريفة سعر بيع الـ kWH ، فهذا السعر يجب أن يحقق تغطية لجميع المصاريف السابقة وتغطية خدمة الدين (إذا كان قرضا من البنك) وتغطية معدلات الإهلاك بالإضافة إلى تحقيق عائد للمستثمرين.

وهناك عناصر أخرى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار عند تحديد تعريفة البيع للمستهلك منها:

1- كمية الاستهلاك

فليس مقبولا مثلا أن يكون سعر البيع موحدا مهما كان استهلاك العميل بل يجب تشجيع كبار العملاء المستهلكين بتقديم سعر أقل (وهذا لأنه يقدم فى المقابل خدمة أكبر للاقتصاد القومى بالإنتاج الكثيف وتشغيل العمالة). ولذا يجب أن تكون التسعيرة متدرجة ومراعية لحجم الاستهلاك الكثيف جدا.

2- معامل القدرة

كما يجب ألا يكون الحساب موحدا مهما كان معامل القدرة الخاص بالمستهلك كما فى الشكل A-1.

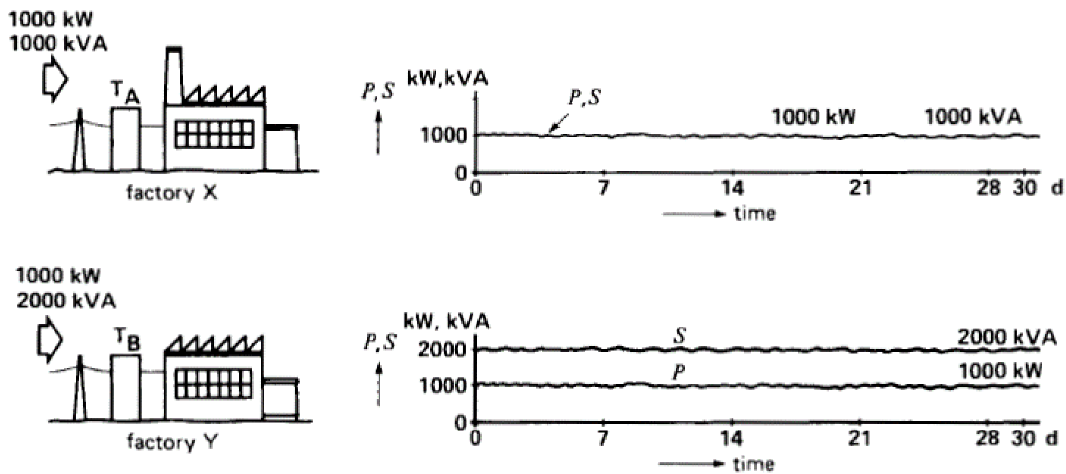


Figure 0 -1 تأثير معامل القدرة

فالمصنع الأول له معامل قدرة يساوى 1 والقدرة الفعالة المستهلكة 1 ميجا وات وبالتالى سيحتاج أن يسحب من الشبكة 1MVA ، بينما المصنع الثانى له معامل قدرة 0.5 ويسحب نفس القدرة الفعالة ، ولكنه سيسحب قدرة ظاهرة Apparent Poawer من الشبكة 2MVA . فلو تمت محاسبة المصنعين على استهلاك الـ KWH فقط وبنفس التسعيرة سيكون هذا غير عادل للشركة المنتجة ، لأنها حجزت للثانى قدرة أكبر ومع ذلك استهلك مثل الأول ، ولذا يجب أن تضم التسعيرة بندا يتعلق بمعامل القدرة ليرغم أصحاب المصانع الذين لديهم معامل قدرة منخفض على تحسين معامل القدرة لديهم وإلا ستكون هناك غرامة تتناسب مع بعد معامل القدرة عن القيمة المطلوبة (غالبا 0.9) مما يجعل الفاتورة قاسية.

3- الحمل الأقصى

ومن المهم أيضا أن تأخذ التسعيرة فى الاعتبار أقصى حمل Max Demand يصل إليه المستهلك ، وكذلك المدة التى يظل يعمل فيها على هذا الحمل الأقصى. فربما كان لدينا مصنعين كما فى الشكل A-2 ، كلاهما يستهلك 720MWH لكن كما هو واضح فى الشكل فإن الأول له Max Demand يساوى 1000kW بينما الثانى يصل إلى ثلاثة أضعافه.

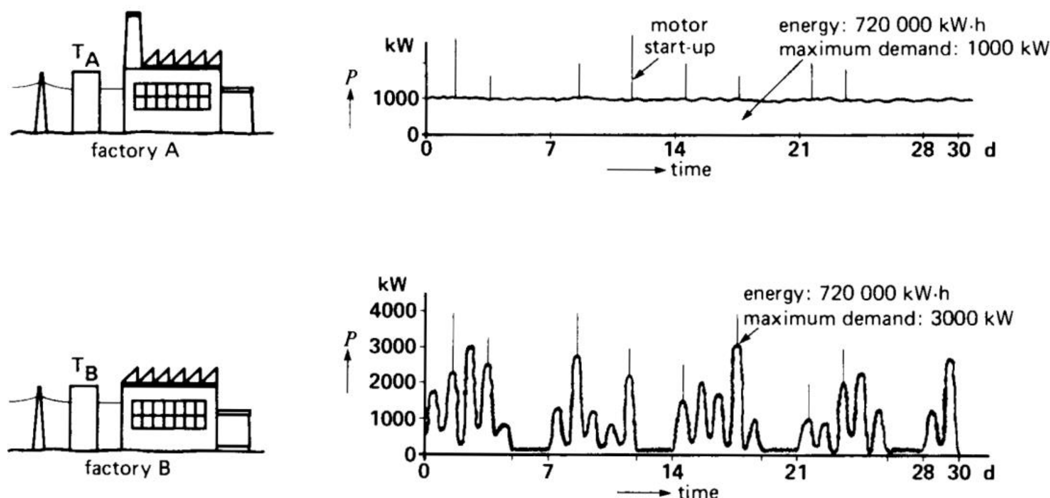


Figure A0 -2 تأثير الحمل الأقصى

فهل يستويان؟

بمعنى آخر أن معامل الـ Load Factor للثانى سئ جدا مقارنا بالأول بالطبع يجب التفرقة لاسيما أن الثانى سيتم حجز قدرة تعاقدية له أكبر من الأول حتى يمكن أن توفى الشركة بتعهدها بتوفير الحمل الأقصى وقت حدوثه ، بغض النظر عن مدة الحدوث . ولذا يجب أن تتضمن الفاتورة بندا يحاسب بسعر خاص (أعلى طبعا) على أقصى قيمة وصل إليها خلال الشهر ومدة حدوثها (توجد عددات خاصة بالمصانع لقياس الـ Max Demand) ، وهذا سيجعل أصحاب المصانع الذين يحتاجون إلى هذه القيمة العالية من الأحمال لمدة وجيزة

أن يبحثوا عن أساليب أخرى لتجاوز هذه المدد الصغيرة ، عن طريق استخدام مولدات خاصة بهم مثلا ، أو عن طريق توزيع الأحمال على مدار اليوم بصورة أفضل ، وتجنب فترة الحمل الأقصى باستخدام أساليب المعروفة بالـ (Demand Mangment).

4- القدرة التعاقدية

كما يجب الأخذ فى الاعتبار حجم التعاقد وحجم التشغيل ، فالبعض قد يتعاقد على قدرة عالية جدا (تحسبا لأى توسعات مستقبلية) ، ويتم توصيل الكابلات والمحولات التى تحقق له هذه القدرة ويتم حجز مغذيات خاصة به فى محطة المحولات الرئيسية ، ثم لا يستغل منها إلا قدرا يسيرا فى تشغيل مصانعه ، وربما تكون المصانع متوقفة ، كما حدث فى إحدى الدول العربية التى حدث فيها Blackout فى أحدى السنين ، وعند مراجعة بيانات المحطات وأحمالها قبل العطل تبين أن هناك بعض المحطات الحمل عليها يساوى صفر (مبنية دون الحاجة إليها) . فلو تمت محاسبة صاحب المصنع فقط على مجرد استهلاكه للكهرباء سيكون هذا كارثيا لشركة الكهرباء التى حجزت له نسبة من قدرتها حسب العقد ثم هو لم يستهلك منها شيئا ، ولذا يجب أن تشمل تعريفة محاسبته نسبة على حجم القدرة المتعاقد عليها سواء استخدم هذه القدرة أم لم يستخدمها.

وكل هذه الاعتبارات أنتجت أساليب متنوعة لـ Tariff منها:

(1) Flat demand rate
(2) Straight line meter rate
(3) Step meter rate
(4) Block rate tariff
(5) Two part tariff
(6) Three part tariff.

وكل دولة قد تضيف عناصر أخرى فى الاعتبار بعد ذلك ، مثل البعد الإجتماعى الذى يقدم مثلا أسعارا أقل لمن يقل استهلاكهم عن نسبة معينة ، ثم تتزايد الشريحة ، وهكذا.

والجدول A-1 نموذج تسعيرة الكهرباء للاستهلاك المنزلى فى مصر (يونيه 2016):

Table 0-1 أسعار الكهرباء للاستهلاك المنزلى فى مصر

4- الاستخدامات المنزلية	
شرائح الاستهلاك(ك.و.س/ شهر)	السعر (قرش/ك.و.س)
من 0-50	7.5
من 51-100	14.5
من 0-200	16.0
من 201-350	30.5
من 351-650	40.5
من 651-1000	71.0
اكثر من 1000	84.0

لاحظ أن الحساب يبدأ بملأ الشريحة الأعلى ثم الأقل ، وليس العكس ، بمعنى لو كان الاستهلاك 450kWH مثلا ، وهذا هو الاستهلاك التقريبى لشقة فى إسكان متوسط ، فيحسب هكذا:

100kWH فى الشريحة من 351−650 = 100x0.34 = 34 جنيه
150kWH فى الشريحة من 201−350 = 150x0.24 = 36 جنيه
200kWH فى الشريحة من 0−200 = 200x0.16 = 32 جنيه

ويصبح الإجمالى 102 جنيه ، وهذا قبل إضافة الدمغات والضرائب ورسم التوريد ورسوم تحسين الخدمة ومصاريف النظافة!.

والجدول A−2 يبين أسعار الكهرباء للمصانع التى تغذى مباشرة بالجهد العالى طبقا لمرفق الكهرباء فى مصر:

Table A-0-2 أسعار الكهرباء لعملاء الجهد العالى

1-استخدامات الطاقة على الجهد الفائق(132-220 ك.ف)				
المشتركين	مقابل القدرة (جنية/ك.و.شهر)	متوسط سعر الطاقة (قرش/ك.و.س)	خارج الذروة (قرش/ك.و.س)	داخل الذروة (قرش/ك.و.س)
كيما			4.7	
مترو الأنفاق			18.0	
الصناعات الكثيفة	15.0	39.6	36.6	54.8
باقى المشتركين	15.0	26.9	24.8	37.2

لاحظ أن شركة كيما لصناعات الألومنيوم بنجع حمادى وأيضا مترو الأنفاق هما فقط اللذين لهما وضع خاص فى التسعيرة ، كما أن المصانع الكبرى تعامل بسعر أقل من المنازل لأنها تخدم الاقتصاد وتوفر عمالة.

أما فى الجهد المتوسط فتحسب من الجدول A−3 :

Table 0-3 أسعار الكهرباء لعملاء الجهد المتوسط

3- استخدامات الطاقة على الجهد المتوسط (11-22 ك.ف)				
المشتركين	مقابل القدرة (جنية/ك.و.شهر)	متوسط سعر الطاقة (قرش/ك.و.س)	خارج الذروة (قرش/ك.و.س)	داخل الذروة (قرش/ك.و.س)
جميع المشتركين	30.0	43.5	40.2	60.2

لاحظ فيما سبق أن البند الأول يحاسب على القدرة التعاقدية kW ، والبند الثانى يحاسب على الاستهلاك kWH مع التفرقة فى سعر الاستهلاك بين الاستهلاك فى وقت الذروة والاستهلاك خارج وقت الذروة.

وفيما يلى أمثلة لتسعيرة الكهرباء فى بعض الولايات الأمريكية:

أولا للتعاقدات السكنية (جهد منخفض):

Minimum monthly charge: $5.00 plus
first 100 kW·h per month at 5 cents/kW·h
next 200 kW·h per month at 3 cents/kW·h
excess over 200 kW·h per month at 2 cents/kW·h

ثانيا للمنشآت التى تغذى بجهد متوسط:

Demand charge: $3.00 per month per kW of billing demand
Energy charge: 4 cents/kW·h for the first 100 hours of billing demand
2 cents/kW·h for the next 50 000 kW·h per month
1.2 cents/kW·h for the remaining energy

ثالثا للمنشآت عالية القدرة:

Demand charge: First 75 000 kW of demand per month at $2.50 per kW
Excess over 75 000 kW of demand per month at $2.00 per kW
Extra charge for any demand in excess of customer's contract demand at $2.20 per month per kW
Energy charge: First 20 million kW·h per month at 6.1 mills per kW·h*
Next 30 million kW·h per month at 6.0 mills per kW·h
Additional energy at 5.9 mills per kW·h

تعظيم عائد الاستثمار فى محطات الكهرباء

إنشاء محطة للتوليد يعتبر مشروعا ضخما من كافة النواحى ، ولذا فعلى المستثمر فى هذا المجال أن يبحث عن طرق تعظيم العائد من هذا المشروع ، وتشمل هذه الطرق :

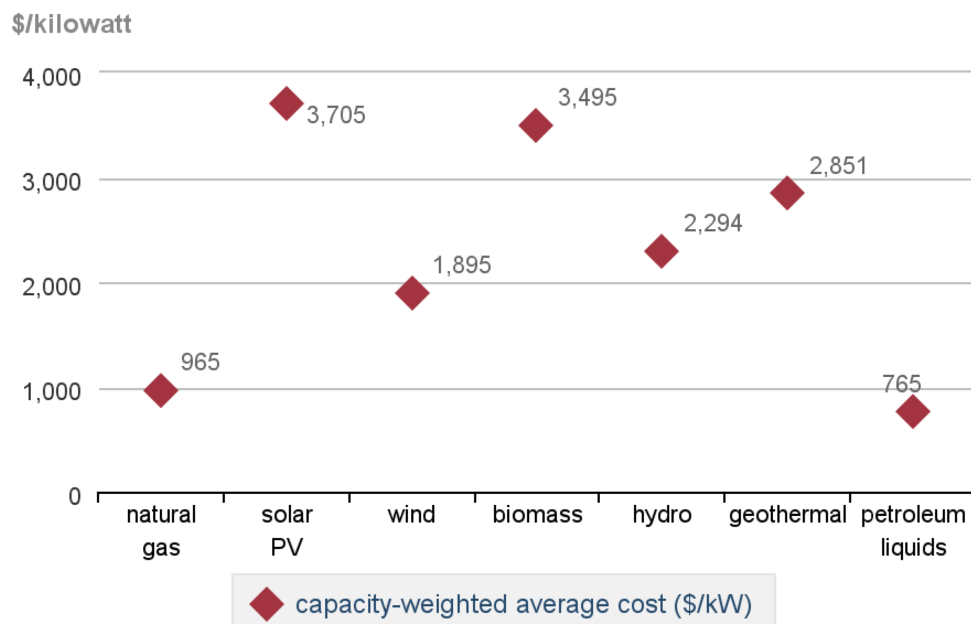
1- تحسين اختياراته فى مرحلة التصميم ، فعليه أن يعرف أولا ما هو أنسب نوع من محطات التوليد يمكن أن يبنيه فى هذه المنطقة (فى المقطع التالى سنورد مقارنة بين أسعار انشاء الأنواع المختلفة من محطات التوليد). وبالطبع فليس بالضرورة لأن تكلفة الإنشاء منخفضة أن تكون هى المحطة الأنسب ، فكما ذكرنا هناك نوع آخر من التكلفة وهى التكلفة الجارية ، كما أن التكلفة الثابتة العالية لا تعنى كذلك رفض هذا الاختيار فربما تكون مصاريف التشغيل شبه معدومة كما فى حالة الخلايا الشمسية.
2- اختيار أفضل المعدات وأطولها عمرا وأعلاها كفاءة.
3- كما تشمل هذه الطرق جعل المحطة تعمل أطول فترة ممكنة ، فلا يعقل أن تنفق هذه المليارات ثم لا تجد مشتريا لهذه البضاعة ، ويفضل دائما أن تعمل المحطة على Load Curve شبه مسطح لأن هذا يعنى كفاءة مرتفعة . وارتفاع الكفاءة مع ارتفاع معدل التشغيل سببه أن التكلفة الثابتة ستتوزع على

إنتاج أكبر فتكون نسبة التكلفة الثابتة فى سعر الـ kWH المنتج صغيرة ، وهذا يجعل الكفاءة Overall Effeciency أعلى.

ويمكن الرجوع لبعض المراجع الواردة فى الكتاب لتطبيق هذه المعلومات على مسائل حسابية لزيادة الفهم.

مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة فى أمريكا

الأشكال التالية تعطى مؤشرا على أسعار إنشاء محطات التوليد الكهربية المختلفة فى الولايات المتحدة الأمريكية (أرقام رسمية). ويمكن الرجوع للمصدر المكتوب أسفل الصورة لمزيد من التفاصيل.
الشكل A–3 يعطى التكلفة (تكلفة الإنشاء فقط دون التشغيل) بالـ $/kW حسب نوع محطة التوليد





Source: U.S. Energy Information Administration

Figure A-0-3 تكلفة إنشاء محطات مختلفة فى أمريكا

والجدول A–4 يعطى مؤشرا على تكلفة الـ kWH فى المحطات النووية (شاملة الإنشاء والوقود والتشغيل):

Table A 0-4

2015 Cost Summary ($/MWh)

Category	Number of Plants / Sites	Fuel	Capital	Operating	Total Operating (Fuel + Operating)	Total Generating (Fuel + Capital + Operating)
All U.S.	58*	6.91	7.97	20.62	27.53	35.50
Plant Size						
Single-Unit	23	7.10	10.26	27.15	34.25	44.52
Multi-Unit	35	6.85	7.31	18.74	25.60	32.90
Operator						
Single	12	7.49	9.30	22.05	29.54	38.84
Fleet	46	6.74	7.58	20.21	26.95	34.53

** Costs exclude shutdown plants. Also excludes Fort Calhoun, Fitzpatrick, and Pilgrim because no data was provided for 2015.*
Source: Electric Utility Cost Group (EUCG)

والجدول A–5 يعطى أسعار تفصيلية للمحطات النووية فى أمريكا حتى عام 2015 ، وستلاحظ تذبذب الأسعار عبر السنين ، وهذا بسبب عوامل عديدة منها أسعار الوقود وأسعار البترول.

Table 0-5

U.S. Nuclear Plant Costs (2015 $):

Year	Fuel	Capital	Operating	Total
2002	5.73	3.92	18.61	28.27
2003	5.60	4.94	18.87	29.40
2004	5.29	5.66	18.56	29.50
2005	5.02	5.81	18.97	29.80
2006	5.05	5.56	19.23	29.85
2007	5.13	6.12	19.09	30.35
2008	5.36	6.77	19.53	31.66
2009	5.94	8.92	20.52	35.38
2010	6.77	9.17	20.66	36.59
2011	7.10	10.07	21.91	39.08
2012	7.47	10.77	21.50	39.75
2013	7.74	8.21	20.95	36.91
2014	7.22	8.19	20.95	36.35
2015	6.91	7.97	20.62	35.50
2002-2015 Increase	**21%**	**103%**	**11%**	**26%**
2010-2015 Increase	**2%**	**-13%**	**0%**	**-3%**

لاحظ أن أسعار إنشاء محطة نووية متذبذب بشكل كبير ، فهو يتراوح فى الخمس سنوات الأخيرة بين 5500 $/kW إلى حوالى 8000$/kW ، وبمعنى آخر أن سعر كل ميجاوات يتراوح بين 6–9 بليون دولار (شاملة أعباء الدين المقترض من المؤسسات المالية).

لاحظ أن السعر من عشر سنوات كان يتراوح بين 1200–1500 $/kW ، وهذا هو النوع الوحيد من المحطات الذى تتذبذب أسعاره بهذا الشكل. والجدول 6–A يعطى أسعار بعض المحطات النووية فى الولايات المتحدة حتى سنة 2008.

Table 0-6 أسعار إنشاء محطات نووية أمريكية

Forecast	**Overnight Cost**	**Total Plant Cost**	**Total Plant Cost - 2 Units**
	($/kW)	($/kW)	(billions$)
DOE (2002)	$1,200		
	$1,500		
MIT (2003)	$2,000		
Keystone Center (2007)	$2,950	$3,600	
	$2,950	$4,000	
Moody's Investor Services (2007)		$4,000	
		$6,000	
Florida Power & Light (2007)	$3,108	$5,492	$12.1
	$4,540	$8,081	$17.8
Progress Energy (2008)			$14.0
Georgia Power (2008)			$6.4 for 45% of 2 plants



الباب الثانى



نقل القوى الكهربية

7

أساليب نقل الطاقة

المقصود بنقل الكهرباء هي عملية نقل الطاقة الكهربية التي ولدتها محطة التوليد إلى محطات التحويل الرئيسية التى ندرسها فى الباب الثالث ، تمهيدا لنقلها بعد ذلك للمستهلكين عبر شبكة التوزيع التى ندرسها فى الباب الرابع.

وفى هذا الفصل سنقدم مقارنة بين أشهر أساليب نقل هذه الطاقة ، وتحديدا :

- مقارنة بين نظامى النقل باستخدام التيار المستمر DC ، والتيار المتردد AC
- مقارنة بين استخدام الخطوط الهوائية والأرضية

لكننا سنبدأ بمقدمة صغيرة عن الجهود المستخدمة فى شبكات النقل وكيفية اختيارها.

7.1 الجهود المستخدمة فى شبكات النقل

تتنوع قيم جهود المستخدمة فى شبكات النقل ، لكن السمة العامة أن جهد خطوط النقل يكون عاليا ، ويبدأ من 66 kV وتصل فى بعض البلاد إلى 400 kV كما فى السعودية والأردن مثلا ، وهذه تسمى شبكات الجهد العالي ، أما شبكات الجهد الفائق فتبدأ من 500 kV كما فى مصر ، وتصل حتى 750 kV كما فى أمريكا.

والجدول 1−7 يعطى تصنيف الخطوط طبقا لقيمة الجهد حسب الـ ANSI Code .

Table 7-1 الجهود المستخدمة فى شبكات النقل

Name or Category	Nominal Voltage (kV)
Subtransmission	34.5
	46
	69
High voltage	115
	138
	161
	230
EHV	345
	400 (Europe)
	500
	765
Ultra-high voltage	1000 (China)

وجهود شبكات النقل فى مصر تبدأ من جهد الـ 66 ك ف ، وأشهر مناطقها هى مناطق القاهرة الكبرى

، وهناك بعد ذلك شبكة جهد 132 ك ف وتغطى منطقة الصعيد كلها ، وهناك شبكة جهد الـ 220 ك ف وهذه تغطى شمال الجمهورية لاسيما الدلتا والأسكندرية ومدن القناة ، وترتبط بها أكثر من ثلثى محطات التوليد ، وهناك شبكة الـ 500 ك ف ، وهذه تبدأ من السد العالى بطول 950 كم حتى سيدى كرير بالأسكندرية ، وترتبط بها معظم محطات التوليد الموجودة بأطراف مدينة القاهرة. ويمكن الرجوع للشبكة العامة فى بداية الباب الأول من هذا الكتاب للمزيد.

وبالطبع فإن الهدف من رفع جهد النقل إلى قيم عالية هو:

1- زيادة القدرة المنقولة بين المحطات والتى تتناسب طرديا مع قيمة الجهد فى محطات الموجودة فى بداية ونهاية الخط.
2- تقليل التيار المار فى الخطوط ، حيث أنه من المعلوم أن القدرة المنقولة هى حاصل ضرب الجهد فى التيار، فإذا ارتفعت قيمة الجهد فستنخفض قيمة التيار عند ثبات قيمة القدرة المنقولة ، وهو ما يترتب عليه عدة فوائد أهمها:
   - خفض الفقد فى القدرة المنقولة ($P_{Loss} = 3 I^2 R$) ،
   - استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل وهذا يعنى سعر أقل ، ووزن أقل ، ويعنى أيضا تكلفة أقل فى بناء الأبراج بالنسبة للخطوط الهوائية.

7.1.1 اختيار جهد النقل

ويتوقف تحديد الجهد المناسب للخط على عاملين أساسيين :

- الأول هو طول الخط.
- والثانى هو القدرة المنقولة عبر الخط.

ويمكن استخدام العلاقة الرياضية التالية أو الجدول 7-2 الذى يليها لتحديد أفضل جهد لشبكة النقل.

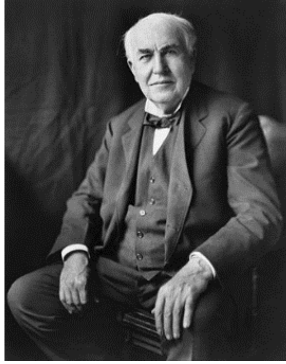
Table 7-2 اختيار جهد النقل حسب القدرة والمسافة

$$E = 5.5\sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{KVA}{150}}$$

جهد المطلوب (KV)	المسافة (km)	القدرة المطلوبة (MW)
765	500	3500
400	400	500
220	150	120
132	50	80

7.2 نبذة عن تطور نقل الطاقة

كانت عملية نقل الكهرباء تتم في بداية توليد الكهرباء عن طريق مد أسلاك توصيل مباشرة بين محطة التوليد (DC Station) ، وبين المشترك كما فعل توماس إديسون (February 11, 1847 – October 18, 1931) في أول محطة طاقة تجارية في التاريخ والتي أنشأتها شركته في نيويورك سنة 1882 (سميت فيما بعد بشركة جنرال إلكتريك) . لكن مع التوسع العمراني وزيادة الطلب وابتعاد المحطات عن المستهلكين بسبب بناءها خارج المدن وبسبب اتساع المدن فقد تعثرت طريقة نقل الطاقة بالطريقة العادية المباشرة من المحطة للمستهلك وأصبحت غير عملية لأن الهبوط فى الجهد الكهربي الحاصل بسبب طول المسافة أصبح كبيرا .



ابتكرت بعد ذلك طريقة جديدة بواسطة جورج وستنجاوس (October 6, 1846 – March 12, 1914) ومعه المهندس الشاب العبقرى نيقولا تسلا (10 July 1856 – 7 January 1943) الذى يعتبر بحق أبو الكهرباء وهى طريقة رفع الجهد الكهربي فى المحطة الرئيسية (AC Station) بواسطة المحولات التى استخدمها تسلا لأول مرة ، ثم نقل الطاقة عبر خطوط الجهد العالي ، ثم فى النهاية خفض الجهد مرة أخرى داخل محطات التحويل القريبة من المستهلكين. وهذه الطريقة حلت مشكلة الفقد فى الطاقة وانخفاض الجهد وذلك بسبب الانخفاض الكبير فى قيمة التيار المار بالخط (نتيجة رفع الجهد) .





7.2.1 مشاكل النقل بنظام الـ AC

لاحقا و مع التوسع فى نقل الطاقة المنقولة بين محطتين ظهرت مشاكل جديدة لم تكن بالحسبان منها :

1- أن عملية النقل إذا تمت بنظام الـ AC فسيترتب على ذلك ظهور معاوقات جديدة لمرور التيار تعرف بالـ (X_L and X_C) Inductive and Capacitive Reactance ، وهذه تختلف عن المقاومة الأومية R المعروفة فى نظام الـ DC ، ويترتب على وجود هذه المعاوقات عدة مشاكل منها زيادة انخفاض الجهد عبر الخط .

2- تبين أن هناك حدودا Limits لأقصى قدرة يمكن نقلها على الخط الواصل بين المحطتين ، وهذه الـ Max power transmitted تتوقف على عدة عوامل منها قيمة جهد الخط فى بدايته ونهايته V_1 , V_2 ، وتتوقف أيضا على قيمة معاوقة الخط X ، وتتوقف أيضا على قيمة الـ Power angle, δ بين جهدى المحطتين ، كما فى المعادلة :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin\delta$$

وهذه المعوقات لم تكن موجودة فى نظام الـ DC الذى كانت حدود النقل فيه تتوقف فقط على التحمل الحرارى للخط ، ومن ثم فالقدرة المنقولة قلت لاسيما مع زيادة طول خطوط النقل (زيادة قيمة X).

3- فى نظام الـ AC يمكن أن يؤثر حدوث أى تغير فى الحمل أو حدوث عطل على استقرار الشبكة وربما يصل الأمر إلى أن يتسبب فى فصل محطة التوليد . (راجع فصل استقرار الشبكة الكهربية بالباب السادس من هذا الكتاب) ، ومنه ستجد أن استقرار الشبكة فى نظام الـ AC أصعب بكثير منه فى حالة الـ DC بسبب الـ Reactive Power كما سيتم شرحه فى الباب السادس ونبذة عن ذلك فى نهاية هذا الباب.

4- ظهور ظواهر مثل Ferranti Effect وظاهرة Arcing Ground فى نظم الـ AC المعزولة ، وظاهرة الكورونا وغيرها من المشاكل المرتبطة بنظام الـ AC والتى لم تكن فى الحسبان ، وما ترتب على ذلك من كثرة عدد الموصلات بسبب استخدام Bundle conductors كما سنرى وبالتالى أصبحت تكلفة الموصلات والأبراج متضاعفة مقارنة بنظام الـ DC.

وبعد ظهور هذه المشاكل عادت فكرة النقل باستخدام HVDC تعود مرة أخرى ولكن بعد تعديلها ، أو قل بعد دمج الطريقتين معا فى طريقة واحدة تستفيد من ميزاتهما وتتجنب عيوبهما.

7.3 مقارنة بين النقل باستخدام الـــ HV-AC باستخدام HV-DC

بالإضافة للنقاط التى ذكرت فى المقطع السابق ، فهناك عناصر أخرى تمثل نقاطا هامة فى المقارنة بين النظامين ، وسنبدأ بعرض عيوب نظام الـ HVDC مقارنة بنظام الـ HV-AC ، ثم نعرض لميزاته:

7.3.1 عيوب نظام الـ HV-DC

1- نقل القدرة بالتيار المستمر يتطلب محطة تحويل من التيار المتردد إلى المستمر فى بداية خط النقل (Rectifier) ، أخرى للتحويل من التيار المستمر إلى المتردد (Inverter) فى نهاية الخط كما فى الشكل 7-1 وهذه المحطات لها تكلفة عالية.

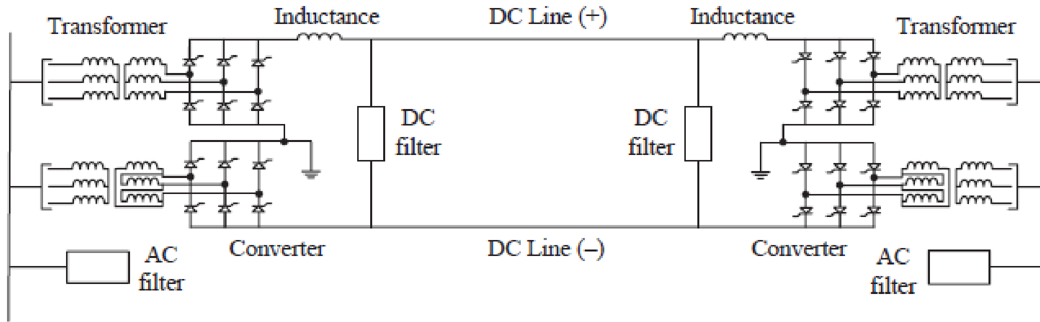


Figure 7-1 منظومة النقل بالـجهد العالى المستمر

2- أجهزة الـ Inverters and Rectifiers المستخدمة فى نظام الـ DC والتى تظهر صورتها فى الشكل 7-2 تعتبر مصدرا للتوافقيات Harmonics الغير مرغوبة فيها مما يتطلب استخدامharmonic filter عند بداية ونهاية الخط كما فى الشكل 7-1 مما يزيد من التكلفة.



Figure 7-2 DC Converter Station

3- من عيوب هذه المحطات أنها تستهلك قدرة غير فعالة بقيم عالية (لكن مع فارق مهم وهو أن هذه القدرة غير الفعالة تستهلك فى بدايات الخط عند المصدر ولا تمر عبر الخط كما فى حالة التيار المتردد).

4- القواطع في شبكاتHV DC تعتبر أكثر تعقيدا بسبب صعوبة إطفاء القوس الكهربية Arc ، فالتيار المستمر ثابت ولا يمر بالصفر ، لذلك يتم تصميمها بشكل خاص باستخدام ثايرثتورات SCRs معينة Gate Turn Off, GTO ، مع دوائر إطفاء Commutation circuts معقدة نسبيا ، أما قواطع شبكات HV AC فإن الأمر سهل لأن التيار المتردد يمر بالصفر مرتين في كل cycle مما يجعل إطفاء القوس الكهربية أكثر سهولة.

5- ومن عيوبها تعقد التصميم والتشغيل والتحكم مقارنة بنظام الـ AC .

7.3.2 مميزات نظام الـــ HV-DC

وكل ما سبق يعتبر من عيوب النقل على الجهد العالى المستمر HVDC ، لكن لهذا النظام فوائد عديدة منها:

1- من أهم ميزات هذا النظام أننا لا نحتاج عند الربط بين شبكتين أن نتأكد من أنهما Synchronized كما فى حالة الـ AC ، وهذه الميزة مهمة جدا لتحسين الـ Stability ، كما أن هذه الميزة واضحة فى شبكتى الصين والهند – وهما أكبر دولتين حدث بهما نمو سريع جدا لشبكة الكهرباء – حيث توسعت الشبكة من خلال إنشاء منظومات متعددة (Grids) يتم الربط بينها بنظام الـ HVDC لسهولة تبادل الطاقة بين المنظومات المختلفة. راجع شكل 1-6 فى الفصل الأول لتجد نموذجا آخر لربط شبكات الولايات المتحدة معا بخطوط HVDC .

2- في نظام الـ DC تكون عدد الأسلاك اثنان Bipolar system فقط كما فى الشكل 7-3 الـ DC ، بينما تكون عدد الأسلاك بالدائرة الواحدة يساوى ثلاثة (three phase) فى نظام الـ AC كما فى الشكل 7-4 ، وهناك أيضا نظام فى الـ DC يستخدم خط واحد فقط للنقل Monoplar على أن يعود التيار خلال الأرض. بالتالي ففى كل الأحوال فإن حجم البرج أيضا فى نظام الـ DC أصغر ، و هذا يعني تكلفة أقل.


Figure 7-3 HVDC system


Figure 7-4 Three-phase system

3- في نظام الـ DC يكون التردد صفرا ، و بالتالى لا توجد مفاعلة حثية X_L ولا مفاعلة سعوية X_C . وهذا يعنى عدم وجود الـ Reactive Power بمشاكلها (التى تدرس تفصيلا فى نهاية الباب) والتى منها عدم اتزان الجهد ومنها التسبب فى زيادة القدرة المفقودة بسبب مرور هذه القدرة غير الفعالة عبر الخطوط ، ولذلك فقد قلنا سابقا أن استقرار منظومة الـ DC أعلى من استقرار منظومة الـ AC.

4- ظاهرة الـ skin effect موجودة فى حالة التيار المتردد فقط ، حيث يمر التيار المتردد حول السطح الخارجى للموصل أى تقل مساحة المقطع الفعلية التى يمر فيها التيار ، بينما هذه الظاهرة غير موجودة فى حالة التيار المستمر حيث يمر التيار فى كامل مقطع الموصل وهذا يعنى أن مقاومة الموصل فى حالة الـ AC أكبر من مقاومته فى حالة الـ DC (المقاومة تتناسب عكسيا مع مساحة المقطع) وهذا يؤدى بالضرورة إلى أن تكون المفاقيد النحاسية (I^2 R) فى حالة الـ DC أقل.

5- مساحة مقطع الموصل فى حالة الـDC أقل من مساحة مقطعه فى حالة الـ AC كنتيجة لظاهرة الـ skin effect السابق شرحها وهذا يقلل من التكلفة الكلية.

6- فى حالة النقل بالتيار المستمر يكون الهبوط فى الجهد على طول الخط (I*R) أقل بكثير من الهبوط فى الجهد فى حالة النقل بالتيار المتردد (I * (R+jX) مما يحسن تنظيم الجهد Voltage Regulation ويزيد من كفاءة نقل القدرة الكهربية .

7- فى حالة الـ DC يسمح باستخدام خط نقل DC بأى طول لنقل أى قدرة (بشرط عدم تجاوز حد التحميل الحرارى للموصلات فقط) ، بينما فى حالة الــ AC هناك حدود لطول خط النقل كما أشرنا فى مقدمة الفصل.

8- فى خط النقل الـ DC لا نستخدم معوضات Compensators على طول خط مثل Shunt or Series capacitors أو Shunt reactors المستخدمة فى خطوط الـ AC .

9- مفاقيد الكورونا Corona Losses في خطوط النقل بالتيار المستمر أقل من نظيراتها في خطوط النقل بالتيار المتردد.

10- فى معظم الحالات تكون قيمة تيار القصر S.C Current فى نظام الـDC أقل بكثير من قيمته فى نظام الـ AC لاسيما فى حالة الوصلات التى تمر خلال الموانع المائية حيث تكتمل دائرة التيار من خلال مقاومة عالية فى حالة القصر فتقل القيمة.

7.3.3 متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟

يعتبر النقل بالتيار المستمر HVDC Transmission اختيارا وحيدا ليس له بديل عند الربط الكهربى بين شبكتين فى الحالات الآتية :

- عندما يكون تردد الشبكتين مختلفا (50 Hz و 60Hz مثلا)
- عند وجود مانع مائى (بحر مثلا) بين الشبكتين بحيث يمنع تركيب معوضات إستاتيكية (static var compensators) بينهما. ومن أشهر الأمثلة على ذلك الخط البحري بين انجلترا وفرنسا ، ويصل طوله إلى 45 كم ويحمل 2000 ميجا وات من خلال كابلات HVDC تحت الماء . لاحظ أن النقل هنا لو كان HV-AC لكان هناك مفاقيد فى التيار هائلة خلال الـ Capacitance الخاصة بالكابل.
- عندما تكون الشبكتين من الضخامة بحيث يصعب على نظم التحكم فيهما عمل synchronization بينهما فى حال الفصل والارتباط.

ملحوظة:

فى بقية هذا الباب سيكون الاهتمام منصبا فقط على نظام الـ AC بتعديلاته.

7.3.4 مقارنة التكلفة فى النظامين

أما بالنسبة للتكلفة ، فتكلفة خط النقل فقط (بالنسبة للكيلو متر الواحد دون أخذ محطات الـ Inverters and Rectifiers فى الاعتبار) للتيار المستمر أقل من مثيلتها بالنسبة للتيار المتردد ، لأن التيار المستمر يحتاج إلى موصلات وعوازل أقل وأبراج نقل ذات أبعاد أقل و بالتالى تكلفة أقل . (ملحوظة : تكلفة محولات رفع/ خفض الجهد لا تؤخذ فى الاعتبار لأنها موجودة فى النظامين).

لكن التكلفة الإجمالى ة ليست مجرد تكلفة خط النقل ، وإنما هناك معدات خاصة بنظام الـ DC . والمنحنى الموجود فى شكل 7-5 يوضح الفرق بين تكلفة النقل بالتيار المستمر والمتردد مقارنة مع طول خط النقل. لاحظ تغير التكلفة الإنشائية لخط النقل بالتيار المتردد و المستمر مع طول النقل على النحو التالى:

1- التكلفة الابتدائية لخط النقل بالتيار المستمر للمسافات الصغيرة أكبر من مثيلتها للتيار المتردد.

2- تغير تكلفة الخط للكيلو متر الواحد بالنسبة لخط النقل بالتيار المتردد أكبر من مثيلتها بالنسبة للتيار المستمر.

3- لكن عند قيمة معينة لطول الخط تسمى Break even distance والتى عندها يتقاطع منحنى التكلفة للتيارين نجد أن تكلفة النقل بالتيار المتردد تكون أعلى. وهذه القيمة تكون لطول يساوى 800 كم تقريبا ، لذلك نجد أنه من الناحية الاقتصادية يستحسن النقل بالتيار المستمر فى المسافات الطويلة (أكبر من 800 كم) بينما يفضل إقتصاديا النقل بالتيار المتردد فى المسافات الأقل من 800 كم.

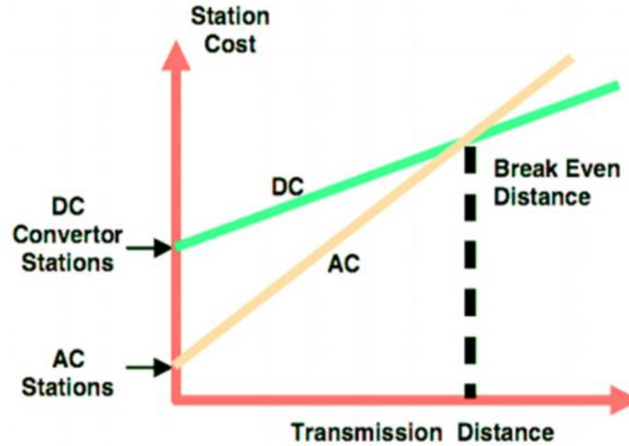


Figure 7-5 مقارنة بيت تكلفة النقل فى النظامين

7.4 مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية

يوجد ثلاثة أنواع لخطوط النقل والتوزيع ، هى :

1. خطوط هوائية Over Head Transmission Lines
2. كوابل أرضية Underground Cables.
3. وهناك نوع ثالث غير شائع ، وهو خطوط الـ Gas-Insulated Lines التى تستخدم غاز الـ SF6 كعازل ، وهذه الطريقة لاتزال محدودة الاستخدام وفى المسافات الصغيرة فقط ، وأطول خط نفذ من هذا النوع كان بطول 700 متر فى ألمانيا . ومعظم هذه الخطوط تكون غالبا داخل محطات التوليد أو محطات التحويل أو لنقل الطاقة بينهما لمسافة غير طويلة خلال أنفاق كما فى الشكل 7-6 التى تمثل نموذجا لإحدى محطات شركة سيمنس.

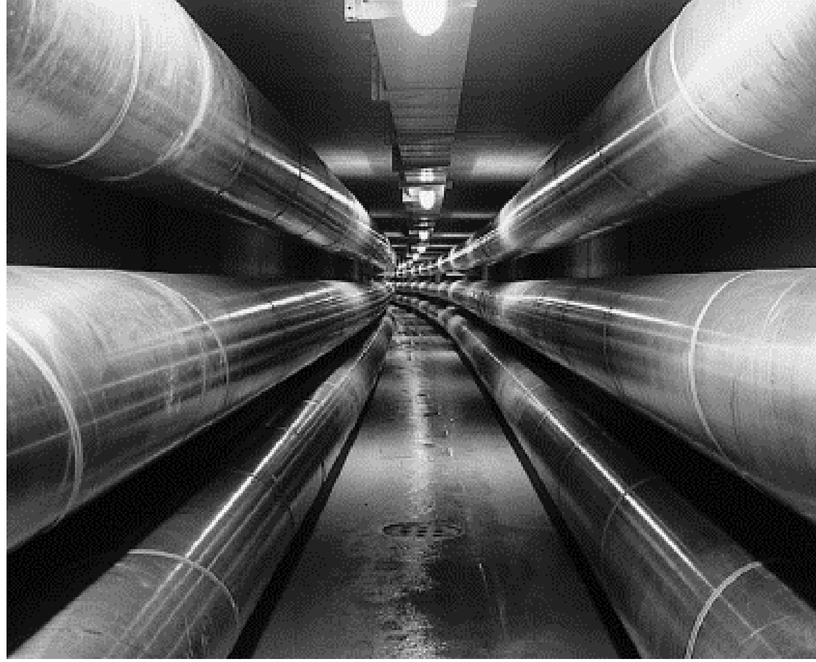


Figure7-6 Gas Insulated Lines

وسيكون التركيز فى هذا الجزء على المقارنة بين النوعين الأولين فقط.

في الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة ، ولذلك تستخدم الأبراج بأنواعها المختلفة لرفع الموصل عن الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان ، ويكون الهواء هو العازل بين الموصلات بعضها البعض على طول مسار الخط ولذلك سميت بالخطوط الهوائية.

ويعتبر استخدام الخطوط الهوائية عموما أفضل اقتصاديا من الكابلات الأرضية ، حيث تبلغ تكلفة خطوط الكبلات من 5 إلى 10 مرات ضعف تكلفة الخطوط الهوائية ذات الإمكانيات المتساوية . ومن ثم فإن التكاليف الثابتة للخطوط الهوائية (تكاليف الإنشاء) أقل كثيرا من الكابلات الأرضية ، إلا أن التكاليف الجارية لها تكون أكثر قليلا من التكاليف الجارية للكابلات ، حيث تحتاج الخطوط الهوائية إلى صيانة دورية من نظافة أو تغيير العوازل وترميم القواعد وتغيير بعض أعضاء الهياكل فى حالة تعرضها لعوامل التعرية وكذلك تغير موصلات مقطوعة أو توصيلها ببعضها بالطرق الفنية السليمة. وبرغم ذلك ، فإن مجموع التكاليف الثابتة والمتغيرة للخطوط الهوائية تظل أقل بكثير من مجموعها للكابلات الأرضية .

لكن مما قد يساعد على تفضيل الكابلات أحيانا هو زيادة مساحة الأرض المطلوبة لإنشاء خطوط النقل الهوائية في حالة استخدام الجهود الزائدة والفائقة وارتفاع تكلفة هذه الأراضي ، فعلى سبيل المثال فإن إنشاء خط هوائي للجهد العالي يتطلب 30.000 متر مربع/ كيلو متر، وبازدياد ثمن الأرض سوف تزداد تكلفة إنشاء مثل هذه الخطوط.

وأيضا مما يميز الكابلات المدفونة تحت الأرض عدم تأثرها بالتغيرات الجوية والعوامل الطبيعية كالرياح وتراكم الجليد والتلوث، وبالتالي يزيد من عمرها الافتراضي عن الخطوط الهوائية . لكن يعيب الكابلات – بالإضافة إلى ارتفاع ثمنها – صعوبة تحديد مكان الخطأ إلا باستخدام السيارات الحديثة المجهزة لذلك.

وعموما ، فالواقع يقول أن نظم النقل تجدها مختلطة Composite Overhead-Underground Lines ، فحينما يكون من الصعب استخدام الخطوط الهوائية لوجود المناطق السكنية فإننا نستخدم الكابلات ، ومن ثم فيمكن أن تجد خطا مكونا من جزئين فقط : U/G Cable + OHTL ، وأحيانا نجده مكونا من ثلاثة أجزاء : U/G Cable + OHTL + U/G Cable .

وتوابع هذا الأمر ستكون بالأساس زيادة فى صعوبة تصميم منظومة الحماية ، فالخط الآن ليس له Charactraistic Impeadance واحدة ، وبالتالى هناك صعوبة فى تحديد مسافة العطل سواء باستخدام الـ Distance realy أو باستخدام Travelling Waves .

7.5 المواضيع الهامة فى دراسة خطوط النقل

والخلاصة حتى الآن أن عملية نقل الكهرباء تعتبر علما قائما بذاته ، وليست كما تبدو للبعض أنها مجرد موصلات تحمل تيارا من مكان لآخر ، وسترى هنا فى هذا الباب أننا نحتاج لدراسات تفصيلية لعلاج مشاكل الفقد ومشاكل الاستقرار ، وتحسين انتظام الجهد وغيرها من المشاكل.

ونستطيع فى نهاية هذه المقدمة الطويلة أن نوجز هنا أهم المواضيع التى يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربية والمتعلقة بخطوط النقل مباشرة:

1–العناصر الرئيسية فى تركيب الخطوط الهوائية وهذه تدرس فى فصلين:

(الفصل الثامن) ، وفيه ندرس:

- الأبراج Transmission towers وأنواعها
- الموصلات conductors وأنواعها والمواد التى تصنع منها
- الملحقات مثل الـ Damping devices وحلقات الكورونا والتأريض وكلامبات الشد ووصلات المنتصف وخلافه.

(الفصل التاسع) ، وفيه ندرس العوازل Insulators وطرق تعليقها وأنواعها وتحسين كفاءتها ، وظاهرة الكورونا إلخ.

2–**حسابات الـ TL Parameters** ، وهذه تدرس فى الفصل الثالث بهذا الباب (الفصل العاشر بالكتاب) ، فكما ذكرنا فى المقدمة فإننا نحتاج إلى دراسة حدود نقل القدرة على خط ما ، وحساب ثبات الجهد وغيره ، وكل

هذا يحتاج إلى حساب قيمة معاوقة الخط أو بمعنى أوسع حساب الـ Parameters الخاصة بالخط وهى ثلاثة عناصر :

- حساب قيمة مقاومة الموصل
- حساب قيمة الـ Inductance وتأثيرها على تحميل الخط
- حساب قيمة الـ Capacitance وتأثيرها على الجهد.

وهناك ظواهر متعددة مرتبطة بهذه الـ Parameters مثل ظاهرة الكورونا والـ Arcing Ground وظاهرة Ferrandi Effect وغيرها ، وهذه الظواهر تدرس أيضا فى هذا الفصل.

3-**تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة** Reactive Power Compensators وهى من الموضوعات الهامة لدراسة التحكم فى القدرة المنقولة بالخط وكذلك المساعدة فى تحسين جهد الشبكة ، وهو ما يطلق عليه خطوط النقل المرنة Flexibale AC Transmission systems أو اختصارا كلمة FACTs ، وهذه تدرس فى الفصل الأخير من هذا الباب (الفصل الحادى عشر).





الأبراج الهوائية لنقل القوى

8.1 تصميم الأبراج

الوظيفة الرئيسية لخطوط النقل الكهربية هي نقل القدرة الكهربية من مكان إلى آخر. والمكون الرئيسي لخط النقل الهوائي هو الموصل أما باقي الأجزاء فهي أجزاء مساعدة لحمل الموصل وعزله عن الأرض. وفى الخطوط الهوائية يستفاد من الهواء كوسط عازل ، ولكن الهواء – شأن كل العوازل – ينكسر عزله إذا زاد الجهد عن قيمة معينة ، وهى فى حالة الهواء تساوى 30 kV/cm ، بمعنى أنه إذا وصل الجهد ين نقطتين إلى أكثر من هذه القيمة فسيتحول الهواء إلى موصل. ولذا كان الغرض من استخدام الأبراج الكهربية هو الحفاظ على الموصلات على ارتفاع آمن من الأرض وكذلك إيجاد مسافة آمنة بينها وبين بعضها البعض .

وتتعدد العوامل التي تؤثر في تصميم الأبراج الكهربية ، فمن أهمها:

1- الجهد الكهربى المستخدم
2- عدد الدوائر التي يحملها البرج.
3- المسافة بين الأبراج.
4- العوامل المناخية التي يتعرض لها الخط (رياح – ثلوج.............) .
5- أقطار الموصلات والمسافة بينها.
6- العوامل الجغرافية (طبيعة الأرض ، إلخ)

فى المراجع الأجنبية ستجد أن البرج إما أن يسمى Tower أو يسمى Pylons، وهذا الاسم الأخير مأخوذ من شكل وطريقة تصنيع البرج والذى يصنع غالبا من تشيكلات حديدية متداخلة (بعض الأبراج تصنع من الخرسانة أو حتى الخشب فى الجهود المنخفضة نسبيا) .

ورغم أن معظم ارتفاعات الأبراج تصل إلى حوالى 50 متر إلا أن هناك حالات خاصة معدودة على مستوى العالم يصل فيها ارتفاع البرج إلى مئات الأمتار (أعلى برج وصل إلى 370 متر وموجود فى الصين) .

وأعلى برجين فى مصر (221 متر) موجودان ضمن خط النقل الهوائى الذى يعبر قناة السويس ، وبالطبع فالهدف منهما تفادى السفن الضخمة التى تعبر القناة.

وهذه إحصائية ببعض أشهر هذه الأبراج حول العالم.

Tower	Year	Country	Town	Pinnacle	Remarks
Zhoushan Island Overhead Powerline Tie	2009–2010	China	Damao Island	370 m	Tallest pylons in the world
Nanjing Yangtze River Crossing	1992	China	Nanjing	257 m	Tallest reinforced concrete pylons in the world
HVDC Yangtze River Crossing Wuhu	2003	China	Wuhu	229 m	Tallest electricity pylons used for HVDC
Elbe Crossing 2	1976–1978	Germany	Stade	227 m	Tallest electricity pylons in Europe
Chushi Powerline Crossing	1962	Japan	Takehara	226 m	Tallest electricity pylons in Japan
Overhead line crossing Suez Canal	1998	Egypt		221 m	
Bosporus overhead line crossing III	1999	Turkey	Istanbul	160 m	

Tower	Year	Country	Town	Pinnacle	Remarks
Pylons of Ghesm Crossing	1984	Iran	Strait of Ghesm	130 m	One pylon standing on a caisson in the sea
Carquinez Strait Powerline Crossing	1901	United States	Benicia	68 m + 20 m	World's first powerline crossing of a larger waterway

8.1.1 عناصر مكونات الأبراج

يتكون أى خط هوائى (شكل 8-1) من ثلاثة عناصر أساسية هى:

1- الأبراج Tower وما تشتمل عليه من قواعد ونظم تأريض.
2- العوازل insulators
3- الموصلات

بالإضافة إلى عدد من الملحقات مثل:

- خط الأرضى Earthing Line ويسمى أيضا Shield condctors للحماية من الصواعق البرقية
- خامدات الاهتزاز Dampers
- فواصل الأسلاك Spacer فى حالة استخدام نظام الـ Bundel Conductors
- الحلقات المعدنية Guarding Rings ، وغيرها.

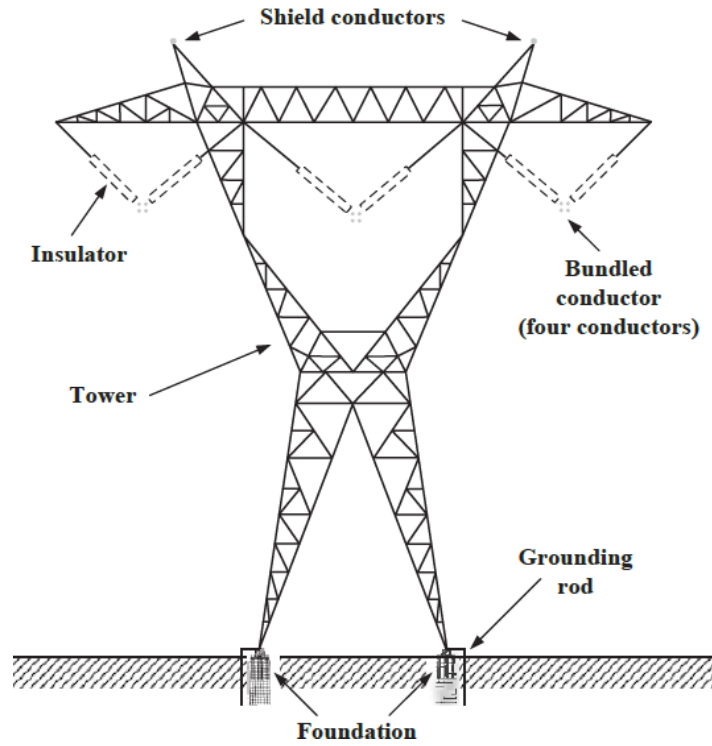


Figure 8-1 مكونات البرج

علما بأن كل برج لابد له من لوحة تعريفية تحمل رقمه (كل برج له رقم خاص لتسهيل عمليات الصيانة أو البحث عن الأعطال).

والمكونات السابقة وغيرها ستشرح هنا فى هذا الباب ضمن ثلاثة فصول :

- هنا فى الفصل الثامن سنعرض شرحا تفصيليا للأبراج والموصلات وملحقاتها.
- أما الفصل التاسع سنخصصه للعوازل فى الأبراج .
- فى الفصل العاشر سندرس كيفية عمل تمثيل Simulation لهذه الخطوط الهوائية وكيفية حساب قيم عناصرها (Resistance, Inductance and Capacitance) ، وندرس أيضا تأثير هذه القيم على أداء خط نقل الطاقة عموما ، وندرس أيضا بعض الظواهر المرتبطة بهذه الـ Parameters مثل ظاهرة الـ Ferrenti Effect ، الـ Arcting Ground ، وظواهر الارتفاع فى الجهد.

8.2 المسافات فى الأبراج الكهربية

يمكن أن يحمل البرج الكهربى دائرة كهربية واحدة (الدائرة الواحدة تحمل موصلات لثلاثة أوجه three phases) ، ويمكن أيضا أن يحمل دائرتين. ويجب أن يراعى عند تصميم الأبراج وجود مسافات آمنة بين الموصلات والأرض ، وكذلك بين الموصلات وبعضها البعض ، وهو الهدف الأساسى من استخدام البرج.

وهناك عدة مسافات تحتاج للتوصيف عند دراسة الأبراج منها:

1- ارتفاع البرج ، والمسافة بين الموصلات والأرض
2- المسافة بين كل برج والبرج الذى يليه
3- مسافة حق طريق المرور Right of Way
4- تقدير المسافات الآمنة من تأثير المجالات الكهربية والمغناطيسية

وفيما يلى ندرس تفصيلا هذه الموضوعات.

8.2.1 ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض

ارتفاع الأبراج تتراوح غالبا بين 15 – 55 متر (باستثناء الأبراج الخاصة التى أشرنا إليها) ، وبالطبع فالعنصر الأساسى فى المقارنة هو قيمة الجهد.

أما الحد الأدنى للمسافة بين الموصلات والأرض فهو يحسب كما يلي :

CLEARANCE ABOVE GROUNDS:
(Clause 77 of Indian Electricity Rules)−−m.

33 KV ---5.100
66 KV -- 5.490
132 KV--- 6.100
220 KV -- 7.015
400 KV--- 8.840

ويمكن حسابها أيضا من بعض المعادلات ، وبالطبع ستتوقف المسافة على الجهد بالدرجة الأولى وأيضا على مقدار الـ Sag المسموح به حتى لا تتلامس الموصلات وقت هبوب الريح. وبعض المعادلات تأخذ مقطع الموصل فى الحسبان . وجدول 8-1 يقدم بعض نماذج لهذه الـ Formulas التى تستخدم فى تحديد هذه المسافات:

Table 8-1

Formula	Where
1) Mecomb's formula $$Spacing(cm) = 0.3048 * V + 4.010 \frac{D}{W} \sqrt{S}$$	V= Voltage of system in KV D= Diameter of Conductor in cm S= Sag in cm W= weight of conductor in Kg/m
2) <u>VDE formula</u> $$Spacing(cm) = 7.5\sqrt{S} + \frac{V^2}{2000}$$	Where- V= Voltage of system in KV S= Sag in cm
❑ Swedish formula $$Spacing(cm) = 6.5\sqrt{S} + 0.7 * E$$	Where- E= Line Voltage in KV S= Sag in cm
❑ French formula $$Spacing(cm) = 8.0\sqrt{S+L} + \frac{E}{1.5}$$	Where- E= Line Voltage in KV S= Sag in cm L= length of insulating string(cm)

8.2.2 المسافة بين البرج والذى يليه

المسافة المثلى (Span) بين أبراج الجهد العالي الهوائية هى المسافة التي تعطي أقل تكلفة للخط مع توفير حدود الآمان المطلوبة. وتجري هذه الحسابات لكل كيلومتر بعد تحديد هل الخط (مفرد أم مزدوج) وهل سيوضع في أرض عادية ومنبسطة أم على أرض ذات تربة ضخرية مثلا، ثم تحديد بعض المعطيات مثل قوة شد الموصلات في أدنى درجة حرارة لها، و تدلي هذه الموصلات في أعلى درجة حرارة لها ، ويؤخذ فى الاعتبار أيضا ارتفاع الأبراج وطول سلاسل عوازل التعليق بالإضافة لحجم وتكاليف القواعد الخرسانية للأبراج والتأريض.

وعادة تجري الحسابات باعتبار المسافة هى 100متر مثلاً بين كل برجين ، ثم تزيد تدريجيا حتى 500 متر ثم نختار المسافة التى تعطى أقل تكلفة . وبالطبع تجرى هذه الحسابات بواسطة برامج خاصة للحصول على النتائج بسرعة.

8.2.3 مسافة طريق مرور الأبراج Right of Way

يجب أن يراعى وجود مسافة مناسبة Right of Way لتباعد المبانى والأشجار عن مسار الخطوط (شكل 8-2) . وتحسب هذه المسافة بحيث إذا سقطت إحدى الأشجار لأى سبب من الأسباب فإنها لا تسقط على الخطوط ، وهذا يستلزم تقدير الطول الأقصى الذى يصل إليه طول الشجرة.



Figure 8-2 Right of Way

كما أن الخطوط يجب أن تكون أعلى من مستوى السيارات المارة تحتها لاسيما سيارات النقل حتى لا يتسبب انخفاضها فى حوادث كما فى الشكل 8-3.

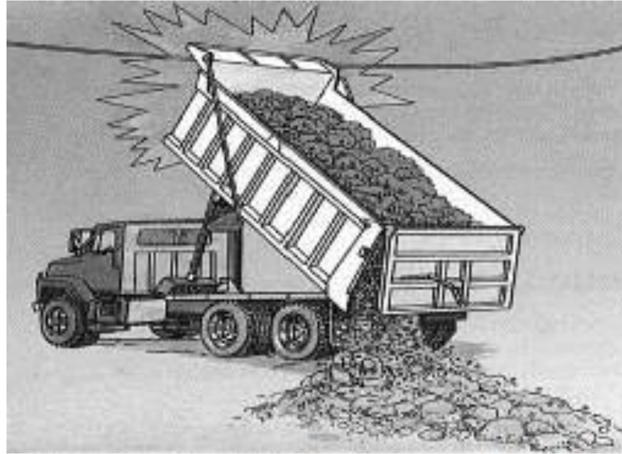


Figure 8-3

علما بأنه فى حالة حدوث حادثة كما فى الصورة السابقة فستكون توابعها أن تنفجر جميع إطارات السيارة كما فى الشكل 8-4 (بسبب ارتفاع فرق الجهد على الهواء الداخلى للإطار) ، لكن الشخص الموجود بداخل السيارة لن يصاب بأذى حتى لو كان جهد الخط 500 ك ف والسبب هو عدم وجود فرق جهد عليه وهو داخل السيارة ، وهو فى ذلك يشبه الطيور التى تقف على خطوط النقل ولا تتأثر بسبب عدم وجود فرق جهد على جسمها. (تذكر أن التيار لا يسير إلا بين نقطتين بينهما فرق للجهد.)



Figure 8-4 السيارة بعد اصطدامها بخط مكهرب

وإنما الخطر الداهم يحدث إذا غادر هذا الشخص السيارة ووقف على الأرض مثلا وأغلق الباب ، عندها سيكون هناك فرق جهد على جسمه كاف لحرقه وليس فقط موته. وعلى أى انسان فى المنطقة المحيطة بالسيارة أن يقف على بعد لا يقل عن 10 متر ، فإذا كان لابد أن يكون على مسافة أقل من ذلك فعليه أن تكون قدميه متجاورتين وملامستين حتى يتجنب ظهور Step Voltage على جسمه.

فإذا أراد الشخص مغادرة السيارة فلا يلمس أى جزء منها ولتكن قدميه متجاورتين كما فى الشكل 8-5.



Figure 8-5 الطريقة المثلى للهروب

8.2.4 تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج

تتميز خطوط القوى الكهربية بأن حولها مجالات كهربية ومغناطيسية (شكل 8-6 وشكل 8-7). وتتوقف شدة وخطورة المجال الكهربى على شدة الجهد ، بينما تتوقف شدة المجال المغناطيسى على شدة التيار .



Figure 8-7

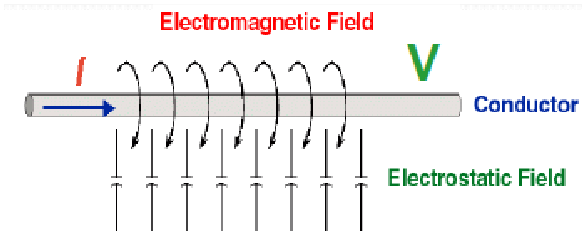


Figure 8-6

وتتوقف شدة المجال أيضا على مدى البعد عن الخط ، فعلى سبيل المثال فى خط 400 ك ف كما فى الشكل 8-8 حيث تكون شدة المجال المغناطيسي أسفل الخط مباشرة حوالى 15 μT بينما تصل إلى 1μT على بعد 60 متر من الخط.

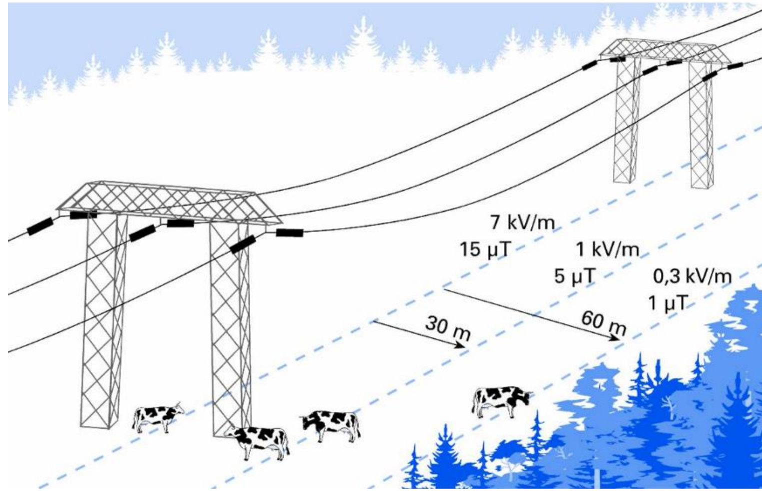


Figure 8-8 شدة المجالات الكهربية والمغناطيسية قرب خط نقل

أما المجال الكهربى فتتراوح قيمته فى المثال السابق بين 7kV/m إلى 0.3kV/m.

ورغم أن الأبحاث متضاربة نوعا ما فى تقدير المسافة التى تسبب خطرا على صحة الإنسان والحيوان إلا أن هناك بعض القيم لا خلاف عليها وهى:

- أقل من متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر خطرا أكيدا
- أكثر من 10 متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر أمانا أكيدا

وبين هاتين القيمتين توجد منطقة البعض يتشدد فيها والبعض يتساهل ، وفى أغلب الأحوال تعتبر مسافة متر لكل 10 كيلوفولت مسافة مناسبة. بالطبع المقصود هنا عند دراسة خطورة هذه المجالات على شخص دائم

التواجد فى هذه المنطقة (طبيعة عمله أو سكنه تقتضى أن يقضى وقتا طويلا بجوار هذه الخطوط)، ولا نقصد تأثيرها على شخص يمر مرورا عابرا .

8.3 أنواع الأبراج :

تصنع الأبراج الكهربية فى الجهود العالية عادة من الصلب المجلفن Galvanized Steel. ويتحدد نوع البرج من طريقة تركيب العازل المركب عليه أو الوظيفة التى يؤديها ، فإذا كان العازل معلقا يصبح نوع البرج برج تعليق و إذا كان العازل مشدودا يصبح نوع البرج برج شد ، كما أن البرج الذى يعبر مانع مائى مثلا يسمى برج عبور ، وهكذا.

8.3.1 أبراج تعليق Suspension Towers :

وتشكل هذه الأبراج حوالى 80 % من إجمالى عدد الأبراج فى الخط وتستخدم فى حمل الموصلات .
وهى الأبراج التى يتم توظيفها لحمل الموصل فقط و لا يقع عليها أى قوى شد أفقية. فأبراج التعليق (شكل 8-9) تعتمد في ثباتها على وجود قوتين للشد متساويتين على جانبي البرج فلو حدث و سقط موصل من إحدى الجهتين فسيتأثر الموصل وكذلك الموصلات على كافة أبراج التعليق المجاورة.

ويمكن تمييز هذا النوع بوجود سلسلة عوازل واحدة لكل موصل عند كل نقطة تعليق كما فى الصورة على عكس الأنواع التالية. و لتجنب إمتداد هذه المشكلة فإننا نستخدم برج شد بعد كل عشرة أبراج تعليق تقريبا.



Figure 8-9 برج تعليق

8.3.2 أبراج شد Tension Towers :

وظيفة أبراج الشد هى تحمل قوى الشد الميكانيكية بصورة مستقلة عن الأبراج السابقة أو اللاحقة. ويمكن تمييز هذا البرج (شكل 8–10) بوجود سلسلتين للعوازل عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطاً بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطاً بالعازل الثاني .


Figure 8-10 برج شد

ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق – كل عشرة أبراج في المتوسط – وذلك لتفادي سقوط السلك من على كل الأبراج حالة حدوث قطع فيه ، لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق ، وحدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج ، وبالتالى سنحتاج لوقت ومجهود كبير وتكلفة عالية للإصلاح.

وأبراج الشد متعددة الأنواع حسب نوع قوى الشد الواقعة عليها كأبراج الشد فى بداية الخط و نهايته أو الأبراج المستخدمة عند تغيير الاتجاه ، أو أبراج عبور المسطحات المائية الصغيرة كالأنهار أو قناة السويس مثلا .

8.3.3 أبراج التبديل Transposition Towers :

وهذه الأبراج (شكل 8–11) يتم من خلالها تبديل الفازات على مسافات متساوية بطول الخط لكى تتساوى الـ Inductance فى الفازات الثلاثة وكذلك تتساوى الـ Capacitance للفازات الثلاثة بطول الخط

فكما سنرى فى الفصل العاشر فإن قيمة الـ Inductance and Capacitance تتوقف على أبعاد البرج وارتفاعات الموصلات عن الأرض ، وهذا يعنى أن الـ Phase العلوى ستكون له Indactance مختلفة فى القيمة عن الـ Phase السفلى ، ومن هنا ظهرت الحاجة لتبديل الفازات على طول الخط ، بحيث يكون Phase-A مثلا فى الأعلى لثلث المسافة ثم فى الوسط ثم فى الأسفل فى الثلثتين الأخرين.

مع ملاحظة إنه يجب ألا يختلف ترتيب الفازات فى بداية الخط عن نهايته بعد إجراء عملية التبادل ، على سبيل المثال لو كان الخط طوله 150 كم فيتم تقسيم هذا الخط إلي ثلاثة قطاعات أو مضاعفاتها بحيث يتم تركيب برج تبادل كل 50 كم من الخط. ويكون Phase-R هو الأعلى فى البداية والأوسط فى المنتصف والأسفل فى النهاية ، ومن ثم يكون هو أيضا الأعلى بعد نهاية الـ 150 كم إذا زاد الطول عن ذلك. وبالطبع فإن برج التبادل هو بالضرورة برج شد .



Figure 8-11 برج تباديل

8.4 الموصلات فى أبراج الجهد العالي :

الموصل هو الجزء الرئيسي في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربية من مكان لآخر. والموصلات المستخدمة في خطوط النقل تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة ، وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان أكثر من 250 متراً ، وهذه المسافة تعرف ببحر السلك أو الـ "Span" .

وتصنع الموصلات من النحاس أو الألمونيوم النقي بدرجة نقاوة لا تقل عن 99.5 % . ويتم سحب الأسلاك النحاسية إما على الساخن أو على البارد ، أما أسلاك الألمونيوم فيتم سحبها على البارد فقط لأن السحب على البارد يعطى قوة شد أعلى.

وكون الموصل معلقاً يجعله دائماً واقعاً تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسيا إلى أسفل مسببا إجهاد شد في الموصل ، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد

الواقع عليها ، ويجب أن تكون خفيفة الوزن حتي تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط .

وعموماً فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

1. المسافة بين البرجين.
2. الشد في المواصلات.
3. هل يكون الخط معرض للاهتزازات نتيجة الرياح أم لا.
4. الفقد في القدرة على الخط.
5. الهبوط في الجهد على الخط.
6. الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط.
7. مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل.

8.4.1 خصائص المواد المستعملة في صناعة المواصلات

1- التوصلية: Conductivity

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الفقد في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية.

2- المتانة الميكانيكية: Mechanical Strength

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة ، وكلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر كلما أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

3- معامل المرونة: Modulus of Elasticity

أن استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه ولذا نحتاج أن يكون معامل المرونة صغيرا.

4- معامل التمدد الحراري: Heat expansion coefficient

فإنه يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير حيث أن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناخية نظراً لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تربو على 40 درجة مئوية وقد تصل إلى درجة 50 أو أكثر في بعض المناطق ، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيراً فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف أو على الأقل تزداد احتمالية تلامسها ببعضها ، في حين أنها ستتكمش انكماشاً شديداً في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع.

5- التكلفة: Cost

والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل وذلك للمحافظة على جعل تكلفة نقل الطاقة الكهربية أقل ما يمكن .

والمادة الأكثر استعمالاً في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألمونيوم حيث أن الألمونيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن له موصلية عالية تقارب 60% من موصلية النحاس إضافة إلى خفة الوزن ورخص الثمن . ورغم أن المتانة الميكانيكية للألمونيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة كما سنرى فى الجزء التالى.

8.5 أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي

8.5.1 الموصلات المجدولة (Stranded Conductors) :

معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة من أسلاك الألومنيوم ملفوفة فوق سلك صلب واحد أو أكثر فى قلب الجديلة ، ويمكن أن تكون أسلاك الألومنيوم عبارة عن طبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب (شكل 8-12) ، ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة لزيادة متانة الشد.



Figure 8-12 ACSR

والموصلات المجدولة تستخدم في الأحمال المرتفعة والجهود العالية لأنها تتحمل تيارات أعلي لنفس مساحة مقطع الموصل وذلك بسبب خاصية الـ skin effect حيث يمر التيار في الطبقات الخارجية للسلك بنسبة أكبر

فى الموصلات المجدولة ، بسبب تعدد الأسطح ، ومع زيادة عدد الأسطح تزداد فرصة مرور التيار بقيمة أكبر بينما فى الموصل المصمت لدينا سطح واحد.

وبالتالي فإن الموصل المجدول يتحمل تيارا كهربيا أعلي من الموصل المصمت لنفس مساحة المقطع فى حالة التيار المتردد ، بالإضافة إلى أنه يمتاز بالمرونة العالية .

ولكن هناك عيبين للموصلات المجدولة :

- الأول أن القطر الخارجي للموصلات المجدولة أكبر من القطر الخارجي للموصلات المصمتة والتي لها نفس المساحة.
- والثانى هو عدم انتظام توزيع الـ Electric Field على سطحه مما يؤدى لزيادة المجال فى مواضع أكثر من الأخرى كما سيتم شرحه فى باب الكابلات.

وهناك أنواع متعددة من الموصلات المجدولة المستخدمة فى الخطوط الهوائية منها:

- Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR),
- All-Aluminum Conductor (AAC),
- All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC),
- Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS),
- Aluminum Aonductor Composite Core (ACCC),
- Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR), and

وفيما يلى شرح لبعض من هذه الأنواع.

8.5.2 موصلات الألمونيوم الخالص

يعتبر الـ All Aluminum Conductor, AAC أرخص أنواع الموصلات ، ولكن بسبب المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسباً فقط عندما تكون المسافة بين كل برجين قصيرة.

8.5.3 الألمونيوم المقوي بالصلب:

يتكون الـ Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أو أكثر من أسلاك الألمونيوم ، كما هو موضح بالشكل 8-13، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألومنيوم وأسلاك الصلب . على سبيل المثال السلك مقطع 30 / 7 أي التي تتكون من 30 سلك ألمونيوم على طبقات (طبقتين فى الرسم) ، و7 أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألومنيوم .

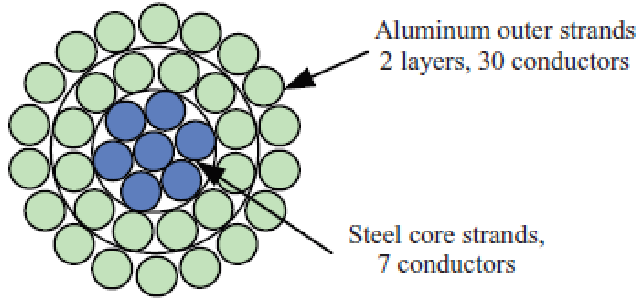


Figure 8-13 ACSR

هذا النوع من الموصلات له متانة أعلي من موصلات الألومنيوم ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج كبيرة ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من الألومنيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية أعلي بكثير من الألومنيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألومنيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

8.5.4 موصلات سبائك الألومنيوم

وهذا النوع : All Aluminum Alloy Conductor , AAAC عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حرارياً من الألومنيوم والمغنسيوم والسيليكون ، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن ACSR ، AAC حيث أن له متانة عالية جداً وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج والتقليل في تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلاً وتحسين أداء الخط . وهذا الموصل له مقاومة كهربية أقل وبالتالي يسبب فقد أقل في القدرة على الخط ، ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة .

8.5.5 الألومنيوم المقوي بسبيكة الألومنيوم

يعتبر : Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR مشابه تماما لـ ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألومنيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألومنيوم وخصائص موصلات الألومنيوم المقوي بالصلب.

8.5.6 سبيكة الألومنيوم المقوي بالصلب:

يعتبر Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced AACSR مشابه لـ ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألومنيوم بأسلاك من سبيكة الألومنيوم ، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصاً في أسلاك الأرضي.

8.5.7 أطوال الموصلات

عادة يكون الموصل ملفوفا على بكرة (درم) بطول يتراوح بين 1 كيلومتر (موصلات Moose or Zebra) وقد تصل إلى 2 كيلومتر كما فى موصلات من النوع Panther أو موصلات التأريض ، وبالطبع سنحتاج لعمل وصلات بين الموصلات باستخدام ما يسمى سرافيل كما فى الشكل 8-14 ، وذلك للوصول للطول اللازم .ويمكن عمل الوصلات بصور أخرى مثل اللحام وغيره.



Figure 8-14 سرافيل الربط

8.6 الاكسسوارات ACCESSORIES التى تستخدم فى الخطوط

هناك أيضا بعض العناصر التى يمكن تصنيفها على أنها ملحقات تتعلق بالموصلات ، مثل كلامبات التعليق والشد ، ومنها أيضا خامد الاهتزازات Dampers ، ومنها كذلك الـ (spacers) وهى الفواصل بين الموصلات عند عمل Bundles Conductors.

وفيما يلى بعض التفاصيل عن هذه الملحقات.

8.6.1 فواصل الموصلات

عند عمل Bundle Conductors ، يمكن استخدام موصلين أو ثلاثة أو أربعة لكل فاز كما فى الشكل 8-15 ، وبالطبع نحتاج لفواصل بين هذه الموصلات لضمان وجود مسافة ثابتة بين الموصلات .

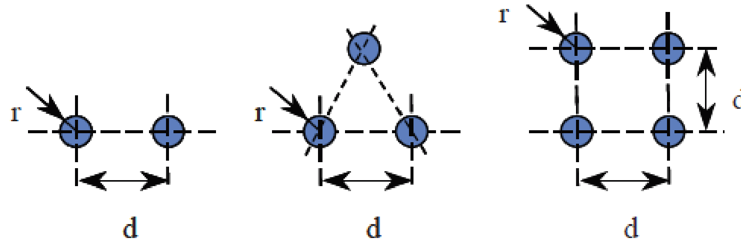


Figure 8-15 Bundle conductors

ويستخدم الـ Spacer كما فى الشكل 8-16. راجع الجزء الخاص بظاهرة الكورونا للمزيد حول هذا الموضوع.



Figure 8-16 Spacer

8.6.2 خامد الاهتزازات Dampers

نتيجة الرياح الشديدة سيكون هناك اهتزازات قد تتسبب مع الوقت فى مشاكل للخط و للعوازل ، ولذا فمعظم الخطوط تكون مزودة (لاسيما فى الجهد العالي) بما يسمى Stockbridge dampers كما فى الشكل 8-17



Figure 8-17 Dampers

وفكرة العمل كما فى الشكل 8-18 أن الاهتزازات تنتقل من نقطة الاتصال رقم 6 إلى كابل قصير رقم 11 مركب عليه أثقال (غالبا كتل خرسانية أو معدنية) رقم 12 ، وطول الكابل مع الكتل المركبة مصممة بحيث تستنفذ طاقة الاهتزازات فيهم . ويتم تركيبه فى بداية ونهاية كل موصل بين برجين.



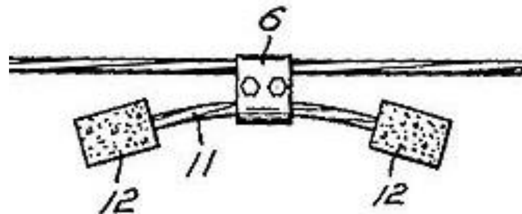


Figure 8-18 Damper in detailed

وهناك نوع آخر لإخماد الاهتزازات يسمى spiral vibration damper وهو سلك ثقيل يلف مثل السوسته حول الموصل فى كل جهة من جهات التثبيت كما فى الشكل 8–19. وقد يستعمل النوعان معا.



Figure 8-19 Spiral Damper

8.6.3 كرات تحذير الطائرات

لعلك تلاحظ فى بعض خطوط نقل القوى وجود كرات كما فى الشكل 8–20 ، والتى أحيانا توضع على موصل الأرضى ، والغرض من هذه الكرات هو تحذير الطائرات المارة بالمنطقة إذا كانت قريبة من المطارات لاسيما طائرات الهيلوكوبتر التى قد تطير على ارتفاعات منخفضة . وقد تم تطوير هذه الكرات وتم وضع خلايا شمسية على سطحها الخارجى وكذلك مجموعة LEDs بحيث تعمل Flashing بالليل ويبلغ قطر الكرة حوالى 60 سم.





Figure 8-20 Warning Ball and Falsh

كما يوجد نوع آخر من أجهزة الإنارة والتحذير يوضع على قمم أبراج الضغط العالي حسب تعليمات منظمة هيئة الطيران المدنى وفية إلزام بأن أى برج يزيد ارتفاعه أو يساوى 50 مترا لابد أن يوضع عليه جهاز ضوئى.

9

عوازل خطوط النقل

Insulators

معلوم أن جميع الموصلات المستخدمة في الشبكات الهوائية للجهد العالي والفائق هي موصلات غير معزولة ، و هذا هو السر في إنخفاض التكلفة مقارنة بالكابلات ، لكن في المقابل يجب عزل هذه الموصلات عن الأرض وذلك بتعليقها و رفعها بعيدا عن مستوى الأرض ، و يجب عزلها عن الأبراج الحديدية من خلال سلاسل العوازل.

و تتكون العوازل المستخدمة في خطوط النقل من عدة أطباق Disc Insulators . وبالطبع يتغير عدد أطباق السلسلة حسب الجهد المستخدم. وعندما يكون الحمل الميكانيكى كبيرا يمكن استعمال سلسلتين على التوازى لحمل الموصل الواحد.

وكلما كان الجهد المستخدم عاليا كلما كان عدد الـ Discs أكثر ، وبالتالى طول مجموعة العوازل أكبر . والجدول 9-1 يعطى مثالا على ذلك (وبالطبع سيؤدى ذلك لزيادة تكاليف العازلية و حجم الأبراج) .

Table 9-1 عدد أطباق العوازل حسب الجهد

Line Voltage (kV)	Number of Insulators per String
69	4–6
115	7–9
138	8–10
230	12
345	18
500	24
765	30–35

و هذه العوازل تمثل نقطة الضعف الأساسية في الشبكات الهوائية لعدة أسباب من أهمها تراكم الأتربة عليها مما يجعل من سطحها مسارا سهلا لتسرب التيار من الموصلات إلى الأرض خلال جسم البرج ، و لذا يجب عمل صيانة و نظافة دورية لهذه العوازل إضافة إلى مشكلة عدم انتظام توزيع الجهد على الأقراص المكونة لسلسلة العزل . وهذه المشكلة وغيرها ندرسها لاحقا فى هذا الفصل.

9.1 وظيفة العوازل:

للعوازل وظيفتان أساسيتان هما:

1- وظيفة كهربية: وهي تأمين العزل الكهربية الكامل بين الموصلات (الأسلاك) الكهربية و بين الأبراج الحاملة لها. وهذا لن يتم إلا إذا توفرت فى العازل عدة سمات أهمها الكفاءة العالية للعزل الكهربى تحت أسوأ الظروف الجوية كالمطر و الرطوبة و الأمطار و التلوث ، وأيضا تحمل جهد تشغيل الخط بالإضافة إلى الجهود الناتجة من عمليات الفصل و التوصيل للمهمات.

2- وظيفة ميكانيكية : وهى تثبيت الموصلات الكهربية على الأعمدة أو الأبراج الكهربية في جميع الظروف الجوية المتوقعة ، بحيث تتحمل مختلف القوى الميكانيكية المؤثرة عليها مثل وزن الموصل و قوة الشد.

و يتوقف نوع العوازل و قوتها على نوع الخط المركبة عليه وجهده ، و كذلك على موضعها من البرج المستخدم ، ولها عدة تصنيفات :

9.2 التصنيف حسب الشكل التصميمى:

ويوجد منه عدة تصميمات :

9.2.1 تصميم عوازل الطاقية والمسمار

ويسمى Cap &Pin type insulator ، ويصنع هذا النوع (شكل 9-1و 2) من البورسلين أو الزجاج. و يتميز هذا النوع من العازلات بإمكانية استبدال أى طبق تالف من السلسلة ، كذلك فإنه يصلح لكافة الجهود بدءا من المتوسطة و حتى فائقة الجهد 500 ك ف . ويتم تركيب الأطباق المختلفة معا بتوصيل مسمار الطبق الثانى بالشق أو الثقب الموجود بالأول (شكل 9-1) وهكذا حتى تتكون السلسلة بالطول المطلوب.



Figure 9-1 Cap and Pin

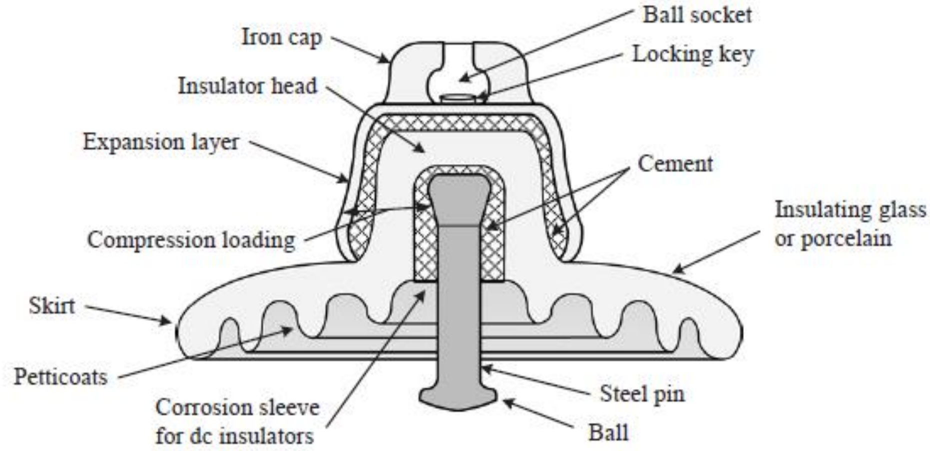


Figure 9-2 Cap and Pin

9.2.2 تصميم عوازل الساق الطويلة

ويصنع Long rod type insulator من البورسلين أو المطاط السليكونى (شكل 9–3) ، وأكثر استعمالاته فى الـ Bushings الخاصة بالكابلات أو المحولات وفى محطات التحويل .

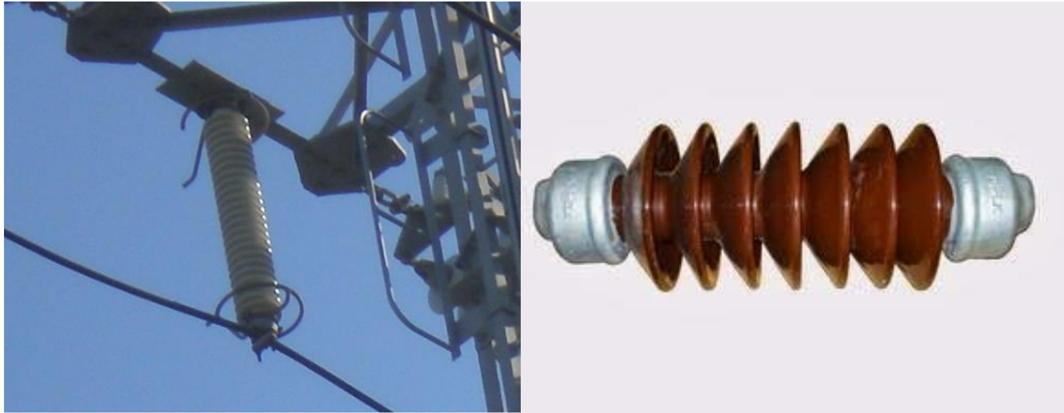


Figure 9-3 Long Rod Insulator

وفى الجهد المتوسط لدينا نوع ثالث وهو Pin type أى عازل المسمار فقط (شكل 9–4) ، ويستخدم حتى 33 كيلو فولت كما فى الصورة . وهو مصنوع من قطعة واحدة من العزل مشكلة على شكل مظلة أو أكثر. والمظلة الواحدة تستعمل فى جهد 11 ك ف وبعده يستعمل مظلتين أو ثلاثة فى الجهود الأعلى كما فى الصورة. وتكون المظلات متباعدة عن بعضها لتحسين العزل أثناء الأمطار. ويصبح استعمال هذا النوع من العوازل مرفوضا فى الجهود العالية لصعوبة تغييره.





Figure 9-4 Pin Type Insulator

ملحوظة هامة:

قد يتسائل البعض هل هو مقصود فعلا أن يكون جسم العوازل بهذا الشكل وتلك المظلات؟ بالطبع نعم وهناك هدف هام من وراء هذا التصميم ، وهو جعل السطح الخارجى لمظلات العوازل يقع على الخطوط متساوية الجهد Equi-Potential lines للمجال الكهربي للموصلات (شكل 9-5) ومن ثم يقل أو يمنع تسرب التيار بين هذه النقاط لأنها ستكون متساوية الجهد. لاحظ أن شكل العازل يشبه شكل خطوط توزيع المجال.

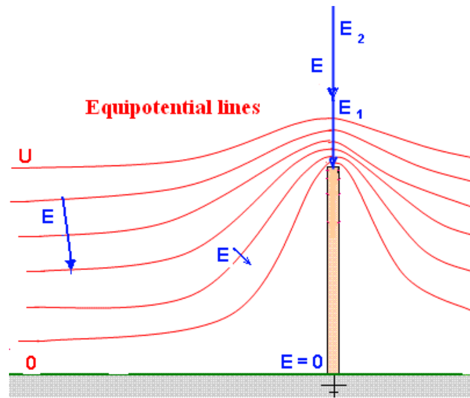


Figure 9-5 خطوط تساوى الجهد

9.3 تصنيف العوازل حسب مادة الصنع:

9.3.1 عوازل بورسلين: Porcelain :

وهو نفسه الذى نسميه الخزف ويتمتع بعازلية كهربية مرتفعة إذا كان متجانسا و نقيا و معالجا بصورة جيدة و خاليا من أي مسامات أو شوائب أو فقاعات مهما صغرت.

وتصنع عوازل البورسلين من سيليكات الألومنيوم ويخلط مع مادة الكاولين البلاستيكية ومادة الكوارتز ، وتصل شدة المجال الكهربى دون الانهيار إلى 60kV/cm بينما يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى 5,000 Kg / cm^2 ، ويصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى 500 Kg / cm^2.

ويصنع من البورسلين نوعي العوازل Cap &Pin Type و Long rod Type على السواء.

9.3.2 العوازل الزجاجـــية:Glasses

يتم تصنيع الزجاج (شكل 9–6) من السليكون ويكون عزله عاليا يصل إلى 140 kV/cm. ويتحمل قوة ضغط و قوة شد ميكانيكى بدرجة أكبر من أو على الأقل تساوى تلك التى يتحملها البورسلين (يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى $10{,}000\ Kg / cm^2$ ، بينما يصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى $500\ Kg / cm^2$) كما أنه أرخص وأطول عمرا من البورسلين.

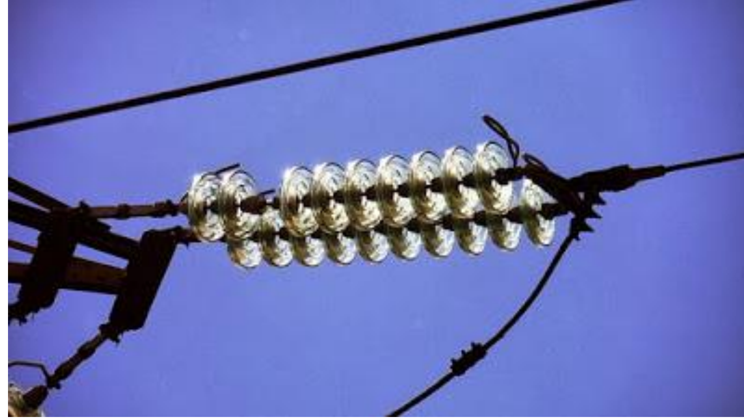


Figure 9-6 عوازل زجاجية

ويمتاز بأنه شفاف مما يجعل رؤية أى شوائب أو فقاعات غازية أو شروخ ممكنة بالعين المجردة و يعد شفافا بالنسبة للإشعاعات الحرارية ، و لذلك لا يسخن كثيرا بتعرضه لأشعة الشمس ، بالإضافة إلى أن معامل تمدده أقل من الخزف وهذا يجعل الإجهاد الذى يتعرض له نتيجة تغير درجة الحرارة أقل.

و له ميزة عملية تكمن في أنه إذا تعرض لصدمات ميكانيكية كرمي الحجارة عليه فإنه يكسر بالكامل فيسهل اكتشاف موقع العطل في خط النقل (أصبحت نقطة ضعفه هى سر تميزه) . بينما يتشقق عازل البورسلين فقط في الحالات المشابهة و بالتالي يصعب اكتشافه بالنظر إليه من سطح الأرض. ويصنع من الزجاج عوازل Cap & pin فقط.

و يكمن العيب الرئيسي للزجاج في سهولة تكاثف الرطوبة على سطحه ، و هذا يقلل إمكانية استخدامه في المناطق الرطبة .

9.3.3 العوازل المطاطـــية: rubber

تصنع هذه العوازل من البلاستيك المقوى و المطاط (البوليمر) و تتميز هذه العوازل بخفة وزنها مقارنة بالعوازل الأخرى،. يمتاز هذا النوع بعازلية فائقة لا تسمح للماء بالتواصل مع التلوث على العازل مما يحد من تأثر هذه العوازل بالتلوث (يحدث نوع من التكور (شكل 9–7) ومن ثم لا يكون هناك مسار متصل فيصعب على التيار أن يتسرب من خلال سطح العازل) .

كما يمتاز بخفة وزنه الكبيرة مقارنة بالعوازل الأخرى (نسبة واحد إلى 30) من وزن عازل البورسلين كما يمتاز بسهولة تركيبه على الأبراج . إلا أن أسعارها لا زالت أعلى من أسعار العوازل الزجاجية أو المصنوعة من البورسلين. ويصنع منه عوازل من نوع Long rod فقط.

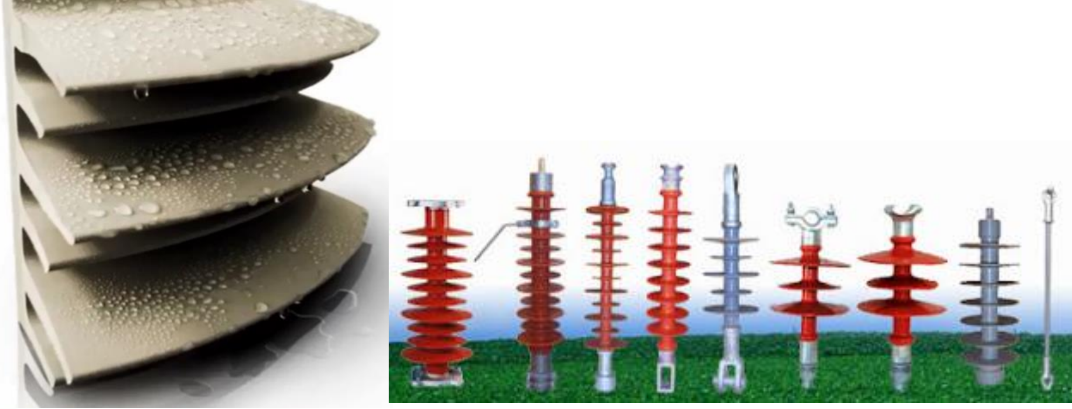


Figure 9-7 عوازل مطاطية

9.4 الأعطال التي تتعرض لها العوازل:

1- كسر العوازل: وذلك نتيجة تعرضها للعوامل الجوية مثل (الصواعق) أو نتيجة تعرضها للعبث أو نتيجة صدأ و تشقق القطع المعدنية المكونة لسلسلة العوازل .

2- انهيار العازلية Breakdown: يكون ذلك كنتيجة للعوامل التالية:

1. نتيجة تلوث العوازل سواء من العوامل الجوية أو قربها من المصانع التي تخرج مخلفات تؤثر على سلاسل العوازل (كالإسمنت ، البوتاس ، . . . الخ)
2. تعرضها للجهود العالية سواء بسبب العوامل الجوية كالصواعق المفاجئة ، أو بسبب Switching الخ.
3. وجود تيارات متسربة. Leakage Current

9.4.1 تأثير التلوث على أداء العازل

يحتوى التلوث الطبيعى على نسبة عالية من الأملاح ، و نتيجة لوجود الشبورة المائية و حتى فى وجود الأمطار يذوب الملح على سطح العازل منشأ مسارا موصلا وبالتالى مسببا هبوطاً فى قيمة مستوى العزل حيث ينتج مسار لمرور التيار خلال الأتربة ذو مقاومة أقل من مقاومة العازل ، ويكون هذا المسار بالتوازى مع العازل الأصلى مما يقلل القيمة الكلية للمقاومة الناتجة فتقل مقاومة العزل ، و نتيجة لذلك يحدث Flashover على سلسلة العازل وهذا الأخير قد يتسبب فى حدوث شروخ على سطح العازل وخروج الدائرة من الخدمة بواسطة أجهزة الوقاية .

9.4.2 كيفية حدوث الومضة الكهربية Flashover

سلسلة العزل تمثل بمكثف ، القطب الموجب له هو الخط الهوائى أما القطب السالب فهو الأرض (يمثلها هنا مسمار العازل المتصل بجسم البرج المؤرض) و الوسط العازل بينهما هو سلسلة العازلات .

ففى الوضع الطبيعى بدون أى تلوث أو أطباق تالفة لن يكون هناك أى مجال لحدوث Flashover باستثناء حالة واحدة فقط و هى حدوث Over-voltages على الخط بأكثر من% 150 من جهد الخط.

أما فى وجود الملوثات على سطح السلسلة فسوف تقل قيمة العزل بين القطبين الموجب و السالب إلى أن يحدث انهيار لقيمة العزل منها يحدث الــFlashover . وعند حدوث ذلك تصبح سلسلة العازل كما لو كانت مقاومة يسرى التيار من أحد طرفيها إلى الطرف الآخر وهذا بالطبع يعتبر Short circuit وسيتدخل جهاز الحماية لاكتشافه وعزله مما يسبب تعطل الخط.
وهذا الـ Flash over غالبا لا يسبب تلف العازل بل يعود العزل لأداء وظيفته العادية بعد حدوثه مالم تكن كمية الحرارة الناتجة عنه كبيرة جدا بحيث تسبب احتراق سلسلة العازل.

والشكل 9-8 يظهر المسافات التى يحدث عليها Flashover ، فهناك مسارات طويلة وهناك مسافات مختصرة وهى الأخطر مثل D+B+C أو A+B+C وهكذا. لاحظ أن لدينا فرق بين المسافة التى يزحف عليها التيار Creepage distance وبين المسافة المختصرة Clearance Distance كما هو واضح فى الجزء التالى.

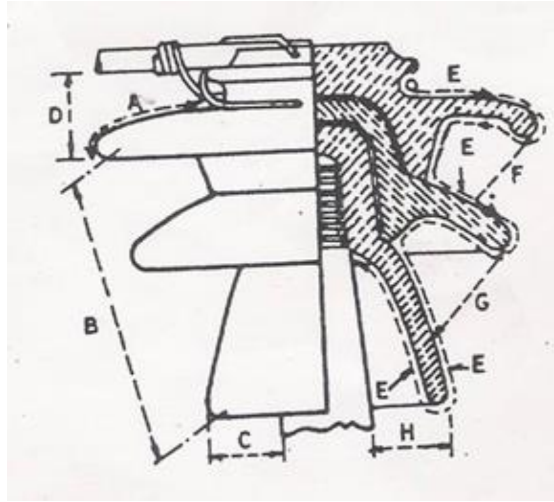


Figure 9-8

9.4.3 ما هى الــ Creepage Distance ؟ .

هو مصطلح مهم فى موضوع العزل والتلوث وتعنى مسافة الزحف ، ويستخدم هذا المصطلح فى تصميم العوازل بناءا على نسبة التلوث فى المنطقة ، ويمكن تعريفه على أنه أقصر مسار مقاس خلال سطح العازل يصل بين

نقطتين موصلتين (المسار كله يجب أن يكون على سطح العازل) و يمكن للتيار أن يسلكه ويسبب انهيار كهربى ، وبالطبع هذه المسافة تختلف عما يعرف بالـ Clearance Distance ويقصد بها أقصر مسافة فعلية بين نقطتين موصلتين لتحقيق مسافة آمنة تمنع حدوث arc بينهما كما فى الشكل 9−9 (ليس بالضرورة أن يكون المسار بالكامل على سطح العازل كما فى المصطلح السابق) .

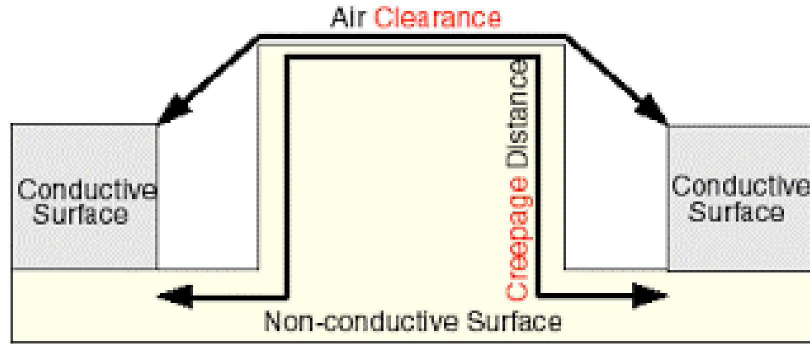


Figure 9-9 مسافة الزحف

والجدول 9−2 من المواصفات الألمانية لتحديد مسافة الزحف حسب درجة التلوث.

Table 9-2 مسافة الزحف حسب درجة التلوث

Voltage r.m.s. [1)]	Minimum creepage distances								
	Printed wiring material								
	Pollution degree								
	1	2	1	2			3		
	All material groups	All material groups except IIIb	All material groups	Material group I	Material group II	Material group III	Material group I	Material group II	Material group III [2)]
V	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
25	0,025	0,040	0,125	0,500	0,500	0,500	1,250	1,250	1,250
32	0,025	0,040	0,14	0,53	0,53	0,53	1,30	1,30	1,30
40	0,025	0,040	0,16	0,56	0,80	1,10	1,40	1,60	1,80
50	0,025	0,040	0,18	0,60	0,85	1,20	1,50	1,70	1,90
63	0,040	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,60	1,80	2,00
80	0,063	0,100	0,22	0,67	0,95	1,30	1,70	1,90	2,10
100	0,100	0,160	0,25	0,71	1,00	1,40	1,80	2,00	2,20
125	0,160	0,250	0,28	0,75	1,05	1,50	1,90	2,10	2,40
160	0,250	0,400	0,32	0,80	1,10	1,60	2,00	2,20	2,50
200	0,400	0,630	0,42	1,00	1,40	2,00	2,50	2,80	3,20
250	0,560	1,000	0,56	1,25	1,80	2,50	3,20	3,60	4,00
320	0,75	1,60	0,75	1,60	2,20	3,20	4,00	4,50	5,00
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11,0	12,5
1000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14,0	16,0

[1)] This voltage is
- for functional insulation, the working voltage,
- for basic and supplementary insulation of the circuit energized directly from the supply mains (see 4.3.2.2.1), the voltage rationalized through Table F.3a or Table F.3b, based on the rated voltage of the equipment, or the rated insulation voltage,
- for basic and supplementary insulation of systems, equipment and internal circuits not energized directly from the mains (see 4.3.2.2.2), the highest r.m.s. voltage which can occur in the system, equipment or internal circuit when supplied at rated voltage and under the most onerous combination of conditions of operation within equipment rating.

[2)] Material group IIIb is no not recommended for application in pollution degree 3 above 630 V.

9.4.4 تنظيف العوازل

ويعتبر تراكم الأتربة والملوثات أحد أهم العوامل التى تؤدى إلى انهيار العازل وتسرب التيار من فوقه ، ولذلك فمن الضرورى عمل نظافة دورية لهذه العوازل. وتختلف المدة حسب حجم التلوث الموجود فى البيئة. ومن أشهر الطرق لتنظيف العوازل غسلها بالماء – بعد فصل الكهرباء عنها – ثم تطورت الطرق فصار يستخدم الطائرات فى تنظيف العوازل دون فصل التيار باستخدام الماء المقطر (غير موصل للكهرباء) .

ومن الطرق الحديثة استخدام أنواع من العوازل لا يتراكم عليها التراب ، ففي جزيرة كريت باليونان كان ملح البحر المتبخر يتراكم على العوازل فاستخدموا مادة تشبه الشمع وتم دهن العوازل بها لتساعد على بلورة المياه التي تتكثف عليها و بهذا يصبح المسار للتيار المتسرب متقطعا ولا يسمح بمرور التيار. و يتم الدهان بهذه المادة كل ثلاث سنوات و قد وجد أن تكاليف استخدامها أقل بكثير من تكاليف الصيانة العادية والتى يتم فيها غسل العوازل سواء بالسيارات والروافع أو بالطائرات كما فى الشكل 9–10.



Figure 9-10 تنظيف العوازل بالطائرات و بالأوناش

9.5 أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل

المشكلة الأساسية التى تدمر عوازل الخطوط الهوائية هى تعرضها لجهود عالية على سطحها Over Voltage ، وهذه الجهود العالية كافية لكسر العازل (ليس بالضرورة أن ينكسر طبق العزل فعليا ، بل يكفى أن ينهار العازل على سطحه حتى نقول أن طبق العزل قد انهار) . وهناك أسباب عديدة لحدوث ارتفاع فى جهد الخط أو ظاهرة الـ Over Voltage على الخطوط الهوائية . ومن هذه الأسباب:

1- اصطدام صاعقة برق بالخط
2- حدوث فصل وتوصيل للقواطع CB Switching
3- توصيل المكثفات
4- حدوث Open Circuit وبالتالى ظاهرة Ferro Resonance
5- حدوث ظاهرة Ferranti Effect

والظواهر الأربعة الأول ستجد شرحا تفصيليا لهم فى الباب السادس بالكتاب (الفصل التاسع والعشرون) ، أما الظاهرة الخامسة فهى مشروحة فى هذا الباب فى الفصل الخاص بـ TL Parameters وذلك لارتباطها كليا بخطوط النقل .

9.5.1 تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل

قد يضرب البرق مثلا أحد موصلات الخطوط الهوائية ومن ثم تسير الـ Surge على الخط وتحاول الوصول للأرض من خلال سلسلة العزل ، ولذا تزود السلاسل بما يسمى Rod Gap كما فى الشكل 9-11 ، فإذا ارتفع الجهد فجأة بسبب صاعقة برقية أو غيره كان المرور خلال هذه الـGap أسهل من المرور خلال سلسلة العزل ومن ثم تكون الـ Gap قد حمت السلسلة. وبالطبع سيتوقف طول مسافة الـ Gap على طول السلسلة وجهد الخط.

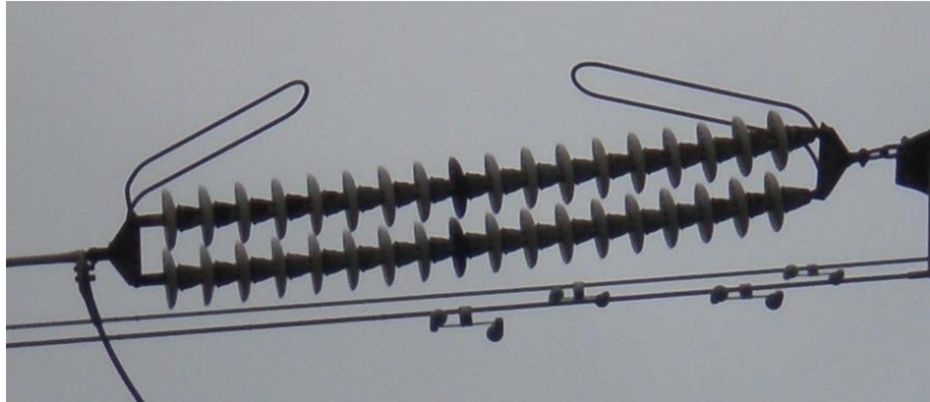


Figure 9-11 Rod Gap

9.6 ظاهرة الكورونا

هى ظاهرة حدوث تفريغ جزئى Partial Discharge لوسط عازل أو مرور تيار متسرب من الموصل الأصلى إلى الهواء الجوى المحيط به بصورة عشوائية نتيجة تأين الهواء المحيط ، وتعتبر هى الظاهرة مؤشرا لحدوث انهيار محتمل للعزل (كلمة العزل تتضمن أيضا الهواء كنوع من العوازل) .

وتحدث هذه الظاهرة عندما يتجاوز شدة المجال الكهربى electric field عند سطح الموصل الحد المعروف بـ disruptive potential gradient وهو الحد الذى يساوى فى حالة الهواء الجوى 30 kV/cm (مع ملاحظة أن هذه القيمة تتغير مع الضغط الجوى ولذا فمشكلة الكورونا أكثر وضوحا فى الأماكن المرتفعة عن سطح الأرض) ويترتب على ذلك أن يصبح الهواء المحيط بالموصل ليس عازلا كاملا بل تصبح له درجة من درجات التوصيل a conductive plasma فقط فى منطقة محيطة بالموصل. لكن قد تزداد هذه الطبقة الموصلة مع الوقت حتى ينكسر العزل بين الموصلات ويحدث انهيار كامل من خلال شرارة كهربية.

والمجال الكهربى عموما يزداد عند الأسطح الحادة لأن التغير فى قيمة الجهد يكون كبيرا وليس تدريجيا كما فى الأسطح الملساء ومن ثم ترتفع قيمة kV/cm بقيم كبيرة تتسبب فى بروز هذه الظاهرة بوضوح أكبر .

ومن ثم فدائما هناك مسافة كافية بين موصلات خطوط النقل لتجنب الوصول لهذه القيمة. ولكن قد تجد ظروف معينة تجعل المجال الكهربى المسلط على الهواء يتزايد ، وعندها يبدأ الوسط العازل (هواء / زيت / أو غيره) فى التأين .

وتحدث ظاهرة (التفريغ الجزئى) Partial Discharge أو الكورونا فى أى وسط عازل بالقرب من جهود كهربية فى الخدمة ، سواء كان ذلك خطوط النقل أو فى أى عازل آخر مثل الزيت مثلا داخل الـ CB ، ففى حالة خطوط النقل يتأين الهواء المحيط حول موصلات الجهد العالي وتزداد الظاهرة وضوحا كلما كان سطح الموصل غير منتظم وأيضا كلما زادت الرطوبة والتلوث فى الوسط العازل حيث تزداد نسبة ذرات الهواء المتأين حول الموصل .

ويمكن ملاحظة ذلك على خطوط النقل الكهربى كوميض لامع مائل للزرقة (شكل 9-12 ، وتكون هذه الظاهرة مصحوبة بصوت أزيز وإنتاج غاز الأوزون وهذه الظاهرة تسمى Partial Discharge أى يحدث تفريغ جزئى داخل العازل وهو يعتبر مقدمة للانهيار فى العزل Breakdown.



Figure 9-12 corona

وبالطبع ينتج عن وجود هذه الظاهرة حدوث مفاقيد للقدرة الكهربية تسمى.Corona Losses تتمثل فى هالة من الضوء يميل للون البنفسجى أو الأزرق ، والصوت المصاحب للظاهرة إضافة إلى حدوث تداخلات مع موجات الراديو .Radio Interference

وهذه معادلة تقريبية للجهد الذى تبدأ عنده الكورونا بالظهور . وواضح أنها تعتمد على درجة خشونة السطح وعلى قطر الموصل وبعده عن بقية الموصلات الحاملة للجهد

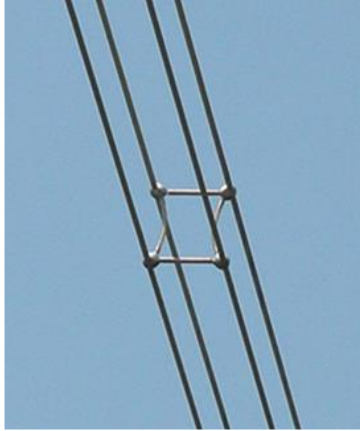
$$V_0 = 21.1 * m \frac{\delta * r(1+0.3)}{\sqrt{r}} \log_n\left(\frac{D}{r}\right)$$

- V_0= corona starting voltage, KV(rms)
- r= radius of conductor in cm
- D= GMD equivalent spacing b/n conductors in cm
- m= roughness factor
  = 1.0 for clean smooth conductor
  =0.85 for stranded conductor

9.6.1 أسباب ظاهرة الكورونا :

- ارتفاع الجهد الكهربى : فمن أهم أسبابها ارتفاع الجهد على الخطوط وبالتالى يزداد شدة المجال وتزداد احتمالية تأين الذرات حول الموصل.
- انخفاض شدة العزل : ومن أسبابها أيضا انخفاض شدة العزل نتيجة تلوث أو رطوبة مثلا . تذكر أن المجال الكهربى يتأثر بقيمة الجهد ولا علاقة له بقيمة التيار ومن ثم فالظاهرة لا تتأثر بقيمة التيار فى الخطوط.
- تقارب الموصلات : ومن أسبابها أيضا تقارب المسافات بين الأجزاء الحاملة للجهد.
- عدم انتظام المجال الكهربى : مع التأكيد على أن أكثر الأماكن تأثرا بهذه الظاهرة هى الأماكن غير المنتظمة السطح حيث يصبح توزيع المجال فيها غير منتظم فيزداد فى نقاط (يحدث فيها التأين) ويقل فى نقاط أخرى.

9.6.2 الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا :


Figure 9-13 Bundle Conductors

1- الحل الأمثل هو زيادة مساحة مقطع الموصل وبالتالى يقل قيمة المجال على سطح الموصل (راجع المعادلة السابقة لحساب الجهد الذى يبدأ عنده حدوث الكورونا ، و ستجد أن قيمة نصف القطر فى مقام المعادلة ، بمعنى كلما زاد نصف القطر كلما كبر الجهد الذى يحدث عنده بداية التفريغ) .

وأحد طرق زيادة المقطع هو استخدام الـ bundled conductors وذلك بجعل موصل الـ Phase الواحدة عبارة عن موصلين أو أكثر ثم عمل short circuit على هذه الموصلات (شكل 9-13) ، وبالتالى يزيد المقطع المكافئ لكل موصل ومن ثم يقل المجال المحيط به فلا تتأين ذرات الهواء.

2- زيادة المسافة الفاصلة بين الفازات لتقليل شدة المجال أيضا ولكن ذلك سيؤدى إلى زيادة حجم البرج وارتفاع التكلفة.

3- ولأن هذه الظاهرة ليست فقط معتمدة على المجال الكهربي ولكنها تتأثر بشدة بشكل الأسطح الحاملة للتيار ، وبصفة عامة يجب تجنب الأسطح الحادة فى خطوط النقل وغيره لتجنب الارتفاع فى الـ Voltage Gradient ، ولذا يستعمل مثلا وسائل تعليق للموصل لها حواف مستديرة الشكل بدلا من الحواف الحادة rounded rather than sharp edges ، وكذلك الحال أيضا بالنسة لـ Spacers وخامد الاهتزازات (لاحظ الصور السابقة لهذه العناصر).

4- وبالتاكيد يجب تجنب الارتفاع فى الجهد لأنه أحد أهم الأسباب الرئيسية.

5- استخدام ما يعرف بـ **Corona Rings** ، فمما سبق يتبين أن أحد أهم أسباب هذه الظاهرة هو عدم انتظام السطح وهذا ما يحدث عند تعليق الموصل بسلسلة العزل فتكون نقطة الاتصال معرضة أكثر من غيرها لحدوث الكورونا بسبب السطح الحاد فى التغير ، ولعلاج ذلك توضع الحلقات كما فى الصورة متصلة بالموصل المعدنى الحامل للجهد فإذا ظهرت الكورونا فإنها تظهر على الحلقات وليس على أطباق العازل ومن ثم فقد تم حماية العزل.

وتستخدم هذه الحلقات (شكل 9-14) أيضا مع مانعات الصواعق Lightening Arrestor وكذلك تستخدم فى أطراف الـ CB والمحولات لنفس الغرض وهو حماية أطراف العزل من التغير المفاجى فى الجهد أو التغير المفاجئ فى الشكل والذى ينتج عنه قيمة مرتفعة لـ Voltage gradient , kV/cm والتى تتسبب فى ظاهرة الكورونا.

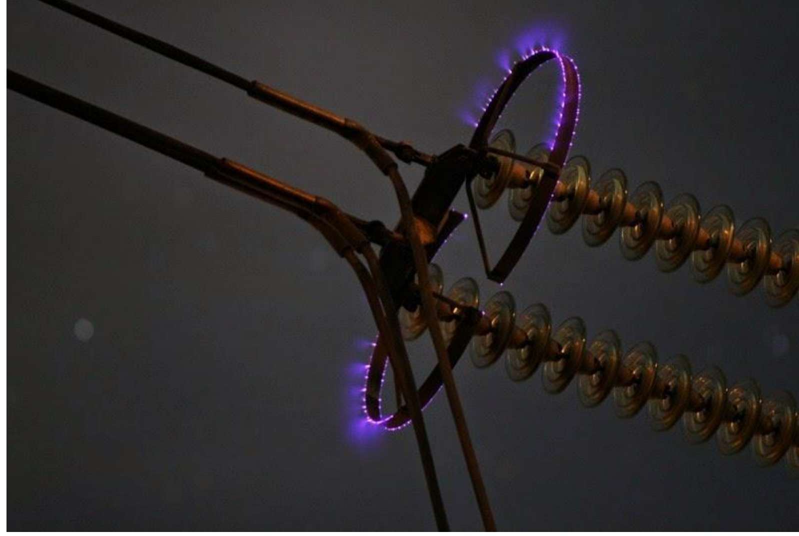


Figure 9-14 Partial Flashover on corona rings

وهذه الحلقات تتصل مباشرة بالموصل كما ذكرنا عند نقطة اتصاله بسلسلة العزل لأنها أخطر منطقة معرضة للكورونا ، ويمكن القول أن هذه الحلقات تغير شكل المجال الكهربى بحيث لا يصبح قادرا على تأين ذرات الهواء المحيطة بالموصل أو العزل. فالـ Gradient, kV/cm أصبح ضعيفا بسبب كبر القيمة الموجودة فى المقام لأن المجال الكهربى أصبح محيطا بحلقة قطرها واسع وليس بنقطة اتصال صغيرة ومن ثم صغرت قيمته.

9.7 توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل:

في حالة استخدام أكثر من قرص Disc في السلسلة String ، كما هو الحال فى شبكات الجهد المرتفع فعندها نظريا سيتم توزيع فرق الجهد على العوازل الموجودة بالسلسلة بالتساوي بمعنى لو كان جهد الشبكة يساوي 500 كيلو فولت فهذا يعني أن الجهد على سلسلة العزل المكونة من 20 قرص مثلا سيساوى 25 kV/disc و هذا طبقا لقانون توزيع الجهد كما في الجزئين يسار الشكل 9-15. حيث يمثل كل قرص وكأنه مكثف وبالتالى يكون لدينا مجموعة من الـ Series Capacitors وهو تمثيل حقيقى فالمكثف ليس سوى لوحين معدنيين بينهما عازل وعليهما فرق للجهد ، وهو الحاصل هنا بين النقاط المعدنية .

لكن هذا غير متحقق في الواقع و السبب هو وجود تلك الوصلات الحديدية التي تربط كل قرص Disc بما قبله و بما بعده في السلسلة ، فهذه الوصلات الحديدية ينشأ بينها و بين حديد البرج مكثفات أخرى تسمى Shunt Capacitors, C_1 كما فى الشكل الأيمن 9-15.

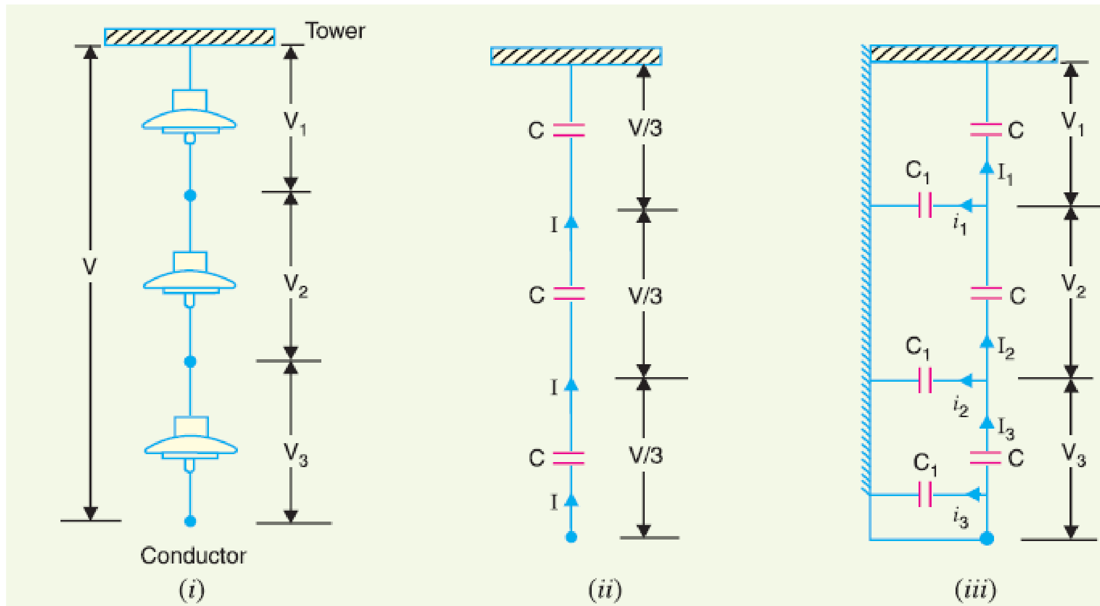


Figure 9-15 توزيع الجهد على سلسلة العزل

فيتغير توزيع التيار ليصبح كما فى أقصى يمين الشكل السابق. و من ثم يصبح التيار المتسرب خلال السلسلة فى حالة افتراض المكثفات الثانية ليس متساويا خلال كل قرص كما في الحالة المثالية الأولى ، بل يصبح التيار الأكبر هو التيار المار في الـ Disc الأقرب إلى الموصل ثم يقل التيار بعد ذلك و من ثم فلم يعد التيار متساويا على كل مسافة و هذا يعني أن بعض أقراص السلسلة ستتعرض لإجهاد كهربي أكثر من غيرها و ربما يحدث لها إنهيار أو على الأقل يحدث خلالها Flashover بسهولة .

9.7.1 رفع كفاءة توزيع الجهد

ونظرا لأن الجهود غير متساوية على عوازل السلسلة الواحدة فقد استخدم مصطلح كفاءة السلسلة أو ما يعرف بـ String Efficiency لتحديد حجم الفرق بين أعلى جهد يظهر على القرص الأول من أجزاء السلسلة من ناحية الموصل و هو القرص المعرض لأعلى جهد ، و بين الجهد الكلي الواقع على الـ String مع ملاحظة أن الجهد يتناقص على الأقراص التالية.

حيث أن: كفاءة السلسلة التى بها عدد n من الأطباق يساوى

$$String\ efficincy = \frac{Voltage\ Across\ the\ string}{n \times Voltage\ across\ disk\ nearest\ to\ Conductor}$$

واضح أن كفاءة السلسلة تقل بزيادة عدد الأطباق نتيجة للتوزيع غير المتماثل للجهد ، فعلى سبيل المثال لو كان الـ Flashover Voltage على عزل ما يساوى 78 ك ف وكان لدينا ثلاث سلاسل مختلفة بها 5 و10 و15 طبق بالسلسلة على التوالي ، فعندئذ سيكون جهد الـ Flashover Voltage على السلاسل الثلاثة يساوى 685 و 490 و280 ك ف على الترتيب (واضح أنه كلما زاد الطول قلت الكفاءة) ، فلو كانت الجهود متساوية لأمكن فى هذه الحالة استخدام 4 و 7 و 9 عوازل .

وبالتالى إذا استطعنا أن نجعل الجهد متساويا على كل أطباق السلسلة فعندئذ يمكن استخدام سلسلة أقصر وأقل تكلفة.

والجدول التالى يعطى بعض النتائج العملية لاختبارات تمت على سلسلة عزل تتزايد عدد الأطباق فيها تدريجيا حتى تصل إلى عشرة أطباق وفى كل مرة نحسب الكفاءة فى حالتين : العازل جاف والعازل رطب والنتائج كما يلى:

[S.O.V. = Spark-over Voltage]

No. in series.	S.O.V., Dry (kV.).	String Effic., Dry. (Per cent.)	S.O.V., Wet (kV.).	String Effic., Wet. (Per cent.)
1	75	100	48	100
2	140	93.4	90	92
3	195	86.7	128	89
4	245	81.8	166	86.5
5	295	78.8	205	85.5
6	345	76.7	245	85.1
7	395	75.4	280	83.4
8	445	74.2	320	83.4
9	490	72.8	355	82.2
10	535	71.4	385	80.3

Example 8.1. *In a 33 kV overhead line, there are three units in the string of insulators. If the capacitance between each insulator pin and earth is 11% of self-capacitance of each insulator, find (i) the distribution of voltage over 3 insulators and (ii) string efficiency.*

Solution. Fig. 8.14. shows the equivalent circuit of string insulators. Let V_1, V_2 and V_3 be the voltage across top, middle and bottom unit respectively. If C is the self-capacitance of each unit, then KC will be the shunt capacitance.

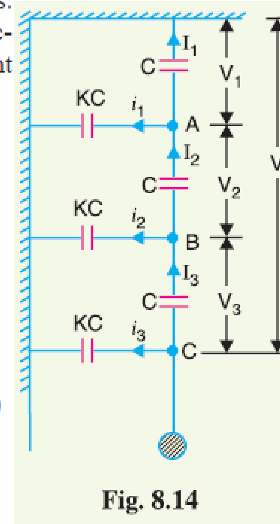


Fig. 8.14

$$K = \frac{\text{Shunt Capacitance}}{\text{Self-capacitance}} = 0.11$$

$$\text{Voltage across string, } V = 33/\sqrt{3} = 19{\cdot}05 \text{ kV}$$

At Junction A

$$I_2 = I_1 + i_1$$

or $$V_2 \omega C = V_1 \omega C + V_1 K \omega C$$

or $$V_2 = V_1(1+K) = V_1(1+0{\cdot}11)$$

or $$V_2 = 1{\cdot}11\, V_1 \quad \ldots(i)$$

At Junction B

$$I_3 = I_2 + i_2$$

or $$V_3 \omega C = V_2 \omega C + (V_1 + V_2) K \omega C$$

or $$V_3 = V_2 + (V_1 + V_2) K$$

$$= 1{\cdot}11 V_1 + (V_1 + 1{\cdot}11\, V_1)\, 0{\cdot}11$$

$\therefore$ $$V_3 = 1{\cdot}342\, V_1$$

(*i*) Voltage across the whole string is

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = V_1 + 1{\cdot}11\, V_1 + 1{\cdot}342\, V_1 = 3{\cdot}452\, V_1$$

or $$19{\cdot}05 = 3{\cdot}452\, V_1$$

$\therefore$ Voltage across top unit, $V_1 = 19{\cdot}05/3{\cdot}452 = $ **5·52 kV**

Voltage across middle unit, $V_2 = 1{\cdot}11\, V_1 = 1{\cdot}11 \times 5{\cdot}52 = $ **6.13 kV**

Voltage across bottom unit, $V_3 = 1{\cdot}342\, V_1 = 1{\cdot}342 \times 5{\cdot}52 = $ **7.4 kV**

(*ii*) $$\text{String efficiency} = \frac{\text{Voltage across string}}{\text{No. of insulators} \times V_3} \times 100 = \frac{19{\cdot}05}{3 \times 7{\cdot}4} \times 100 = \mathbf{85.8\%}$$

9.7.2 علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل

و لعلاج مشكلة المكثفات الناشئة التى تسببت فى عدم تساوى الجهد يمكن نظريا إلغاء هذه المكثفات بزيادة طول ذراع البرج ومن ثم تصبح قيمة هذه الـ Shunt Capacitors مهملة لكن بالطبع هذا حل مكلف بسبب ارتفاع تكلفة تصنيع البرج.

والحل الأمثل الواقعي المستخدم هو أن تضاف الحلقات المعدنية التي نراها في 9–16 والمعروفة باسم Guard Rings و هذه الحلقات تنشئ مكثفات معاكسة من الجهة الأخرى كما في الصورة 9–17 ، و من ثم فإنها تلغي بدرجة كبيرة تأثير Shunt Capacitors السابقة و تقرب الصورة مرة أخرى إلى الحالة المثالية .

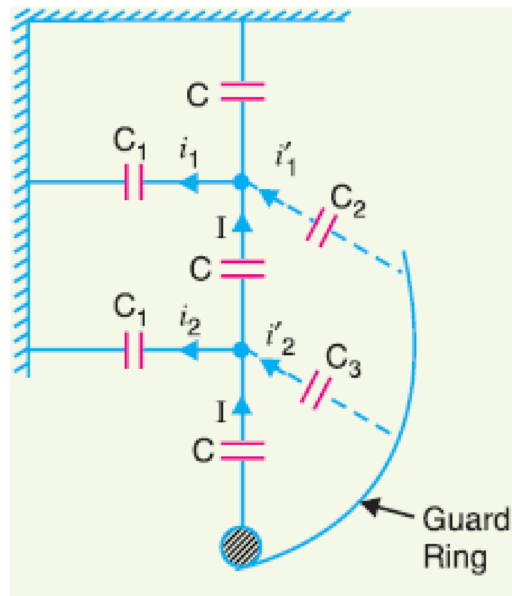


Figure 9-16 guad ring



Figure 9-17

9.7.3 أسلوب الـ Insulation Coordination

وهناك حل ثالث لهذه المشكلة بجعل الـ Capacitance لأطباق العوازل غير متساوية بل متغيرة بنسب التيارات المارة بها وهذا يعنى أن الطبق المجاور للموصل ستكون له أكبر Self Capacitance فى السلسلة ومن ثم تتساوى الجهود على أطباق العوازل لأن الجهد سيتناسب عكسيا مع الـ Self Capacitance للطبق ، وبالتالى يقل الجهد على الطبق المجاور للخط ويزيد على الطبق فى نهاية السلسلة من ناحية البرج ، وهذا يعنى أننا عالجنا الخلل السابق فى توزيع الجهد . وتعرف هذه الطريقة بتنسيق العوازل Insulation Coordination .

10

عناصر تمثيل خطوط النقل

TL Parameters

10.1 مقدمة

أهمية هذا الموضوع تكمن فى أن معرفة هذه القيم هى الأساس فى تمثيل حقيقى للخطوط ، وتمثيل الخطوط هو الأساس فى جميع الحسابات والتحليلات فى منظومة القوى مثل حسابات انتظام الجهد Voltage Regulation وكفاءة النقل Transmission Efficiency وحسابات القصر Short circuit analysis خلافه. ومن هنا كان لابد من حساب هذه الـ Parameters .

وقد يبدو لأول وهلة أن الخط الكهربى هو عبارة عن موصل له مقاومة قيمتها R ، وهذا جزء من الحقيقة ، أما الحقيقة الكاملة فإن الخط يشتمل أيضا على قيمة حثية Inductance, L تمثل مع قيمة المقاومة ما يعرف بالـ Impedance, Z ، ويشتمل الخط أيضا على قيمة سعوية Capacitance, C ، تمثل مع الـ Conductance ما يسمى بالـ Admittance, Y .

وفى الأجزاء التالية سندرس كيفية حساب قيمة كل عنصر من عناصر التمثيل الثلاثة : R, L and Z (Y) ، وتأثير كل واحد منهم على أداء منظومة النقل.

10.2 مقاومة الخط

تمثل المقاومة عنصرا مهما فقط فى الخطوط القصيرة حيث تكون غالبا مرتفعة القيمة ومن ثم تتسبب فى هدر كبير للقدرة .(I^2R loss) على صورة حرارة ، ومع زيادة التحميل ترتفع قيمة التيار ومن ثم القدرة المفقودة على صورة حرارة وترتفع درجة حرارة الموصل فيتمدد ويزداد طوله ويحدث Sag كبير ، فإذا انخفض التيار رجع الموصل لما كان عليه ، لكن إذا ارتفعت قيمة التيار بحيث تتسبب فى حدوث تمدد كبير وفى نفس الوقت لا ينكمش بعد انخفاض التيار نقول أن هذه القيمة للتيار تسمى thermal limit of conductor ويجب أن يكون تحميل الخط دائما أقل من هذه القيمة.

ومعلوم أن مقاومة أى سلك تساوى

$$R = \frac{\rho \times L}{A}$$

ρ is the resistivity of the conductor.

ومعظم الخطوط كما ذكرنا فى الفصل الخاص بتركيب الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات من النوع المعروف بـ ACSR وفى هذا النوع يكون سلك الصلب فى الوسط ومحاط بشعيرات من الألومنيوم على صورة طبقات مجدولة ، وهذا الجدل يتسبب فى أن يكون الطول الفعلى للموصل أكبر بنسبة 2% تقريبا عن الطول الاسمى للخط وبالطبع ستزيد المقاومة.

أيضا ونتيجة ظاهرة الـ Skin Effect حيث يمر يميل التيار المتردد للمرور فى الحدود الخارجية لمقطع الموصل أكثر من مروره فى منتصف المقطع لاسيما مع ارتفاع التردد ، ولهذا تكون R_{AC} أكبر من R_{DC} وهذا سبب آخر لزيادة قيمة المقاومة عن القيمة النظرية من المعادلة السابقة

وأخيرا فإن المقاومة تتناسب طرديا وخطيا مع ارتفاع درجة الحرارة ولذا يجب مراجعة المصنع لمعرفة معاملات التمدد وتصحيح قيم المقاومة.

10.2.1 ظاهرة الــتأثير السطحى Skin Effect

لو نظرنا للموصل على أنه مكون من طبقات (شكل 10-1) وكل طبقة تحمل قدرا من التيار ، وكل تيار يرتبط بقدر معين من الفيض ، فهذا يعنى أن الطبقة الأولى الداخلية ترتبط بقدر من الفيض يبدأ من الداخل ويقطع كل الطبقات التالية ، ثم يأتى تيار الطبقة الثانية فيقطع كل الطبقات من الثانية حتى نهاية الموصل لكنه لا يقطع الطبقة الأولى ، وهذا يعنى أننا كلما اتجهنا لداخل الموصل زاد الفيض المرتبط بالموصل أو ما يعرف بالـ Flux Linkage وكما هو موضح فى الجزء التالى مباشرة فإن قيمة الـ Inductance تتناسب طرديا مع قيمة الـ Flux Linkage وهذا يعنى أن المعاوقة الحثية بالطبقات الداخلية أكبر بكثير من المعاوقة الموجودة فى الطبقات الخارجية ، وهذا يعنى بالضرورة أن التيار فى الطبقات الداخلية سيكون أقل من التيار بالطبقات الخارجية.

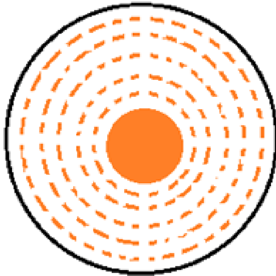


Figure 10-1 توزيع الفيض داخل الموصل

10.2.2 العوامل المؤثرة على الـــ Skin Effect

1- قيمة التردد: معلوم أن الـ Inductive reactance تتأثر طرديا بقيمة التردد فهذا يعنى أنه كلما زاد التردد زادت X_L وبالتالى قل التيار وهذا يؤكد على تناقص قيمة التيار فى وسط الموصل مع تزايد قيمة التردد

2- قطر الموصل: مع تزايد قطر الموصل يزداد الفرق بين قيمة الفيض المرتبط بقلب الموصل (يزداد قوة) وبين الفيض المرتبط بأطراف الموصل الخارجية (يزداد ضعف) وهذا يعنى أن X_L تزاد قيمتها مع تزايد قيمة المقطع .

10.2.3 لماذا نلجأ لاستخدام حزم من الموصلات Bundle Conductors

المناقشة السابقة تفسر لماذا نلجأ إلى عملية الـ Bundle Conductors ، أى استخدام حزمة موصلات صغيرة (من هنا جاء مسمى الموصلات الحزمية) بدلا من موصل واحد كبير ، لأن الموصل الكبير فى مقطعه تظهر فيه ظاهرة الـ Skin Effect بدرجة أكبر ومن ثم يقل الاستفادة من المعدن الداخلى للموصل بل يعتبر وزن إضافى بلا داع ولا فائدة ، ومن هنا نلجأ للـ Bundle .

10.3 القيمة الحثية للخط وتأثيراتها

قد يقول قائل من أين تأتى الـ Inductance ونحن لدينا فقط خط موصل وليس فيه ملفات ؟ وهذا خطأ شائع وهو اعتبار أن الـ Inductance, L لا تظهر إلا فى وجود ملفات Coils ، والسبب فى هذا الخطأ الشائع هو عدم معرفة معنى الـ Inductance .

10.3.1 ما هى الـــ Inductance , L ؟

فى الخطوط الهوائية الطويلة والمتوسطة سنكتشف أن قيمة الـ Inductance, L والقيمة الأومية لها وهى Inductive Reactance, X_L والتى تساوى $X_L = \omega L$ ستكون هى المعاوقة الأساسية للخط وليس المقاومة الأومية R . فمرور التيار المتردد AC Current فى أى خط يكون دائما مصحوبا بظهور هذه المعاوقة X_L .

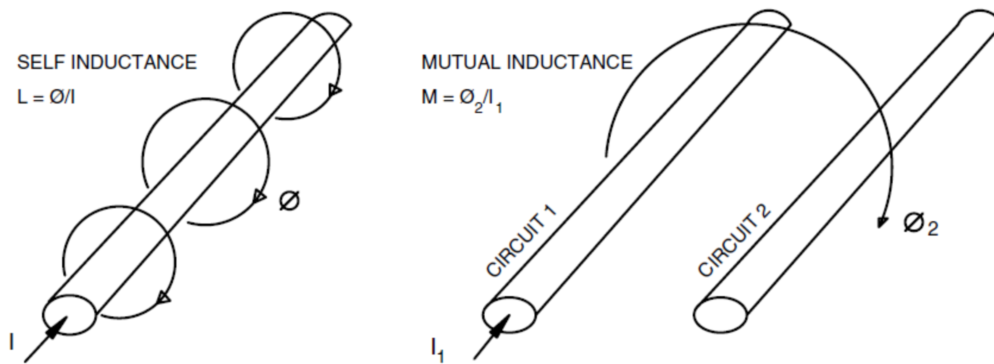
والسبب فى ذلك أن التيار المتردد يكون مصحوبا بمجال مغناطيسي متردد أيضا وهذا المجال يقطع الخط وينشأ فيه emf معاكسة للجهد الأصلى الموجود على الخط فيتسبب ذلك فى انخفاض قيمة التيار المار بالخط ، إذن هناك مقاومة جديدة ظهرت نتيجة مرور التيار **المتردد** ، ونعبر عن هذه الظاهرة بتمثيل هذه المعاوقة الجديدة X_L ، التى لا تظهر إلا فى وجود التيار المتردد (عكس المقاومة R والتى تظهر سواء كان التيار متردد أو ثابت) بل حتى بدون تيار فهى موجودة أما الـ X_L فهى فقط موجودة مادام التيار المتردد موجودا. لاحظ أن هذه المعاوقة

تظهر سواء كان لدينا خط مستقيم أو لدينا ملف ، لكن بالطبع إذا كان السلك على شكل ملف فإن الـ Inductance له ستزيد.

وتعرف الـ Self Inductance بأنها نسبة الفيض المرتبط بالخط مقارنة بالتيار المار في نفس الخط. بمعنى أن $L = Ø/I_1$. وهناك نوع آخر من الـ Inductance تتأثر بالتيار المار فى سلك مجاور فيظهر فى السلك $M = Ø/I_2$, Mutual Inductance كما فى الشكل 10−2 .

ولذا تتوقف قيمة الـ Inductance, L على وضعية الخطوط (الموصلات) بالنسبة للمجال المغناطيسي وهل الخط منفرد أم بجوار خطوط أخرى وهل الخطوط الأخرى متوازية معه وفى نفس الـ Phase أم من Phases أخرى ولهذا ستتوقف قيمة الـ Inductance L على شكل البرج ونوعية الدوائر التى يحملها كما سنرى فى الملحق الموجود بنهاية هذا الباب.

وهذه القيمة تمثل القيمة الكلية لـ L الناتجة من الفيض المرتبط بالموصل داخليا Self Inductance وخارجيا Mutual Inductance ، وتقاس بوحدة الـ Henery, H ، وغالبا تكون لكل كم طولى من الخط.



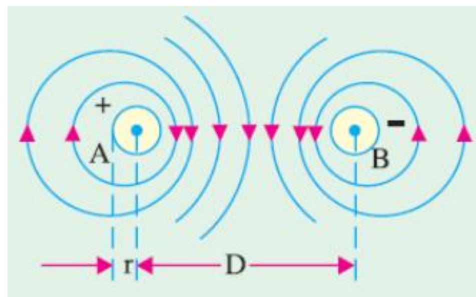


Figure 10-2 Self and Mutual Inductance

والمعادلة التالية تعطى علاقة الـ Inductance بأبعاد الموصلات

$$L = \frac{1}{l}\mu_0 K N^2 A$$

$$L = 2\times10^{4}\left(\frac{\mu}{\pi}\log_e D/r + \frac{\mu_i}{4\pi}\right)\text{henry}$$

لاحظ أن المعادلة الأولى تعطى قيمة الـ Indactance بدلالة عدد اللفات بينما الثانية تعطيها بدلالة المسافات بين الخطوط الهوائية وأقطارها.

وقد يسأل سائل: هل يعنى ذلك أن خط النقل ليس له Indactance لأن عدد اللفات فيه = 1 ؟ والإجابة : رغم أن عدد اللفات بالفعل صغير ويساوى 1 ، لكن مساحة مقطع هذه اللفة الواحدة ضخم جدا ، ولذا قيمة الـ Ind معتبرة. وبسبب هذه المساحة الضخمة تكون الـ Ind فى الخطوط الهوائية أكبر بست مرات منها فى الكابلات ، على عكس الـ Capacitance التى ستكون فى الكابلات أكبر بعشر مرات.

ملحوظة:
عند مرور التيار المتردد فى الملف فإن الملف يخزن طاقة بداخله فى نصف الدورة الموجب ، ويردها للمصدر مرة أخرى فى نصف الدورة السالب ، وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة على شدة التيار المار وعلى قيمة الـ Inductance حسب المعادلة التالية :

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$

حيث الطاقة المخزنة هى W وتقاس بالجول بينما الـ Ind تقاس بالـ Henery, H

10.3.2 تأثير الـ Inductance على الحدود القصوى لنقل الطاقة

أحد أهم القيم المطلوب تحديدها لأى خط هى أقصى قدرة فعالة P يمكن أن تنقل خلاله بين محطتين لهما جهدان يساويان V_1 and V_2 كما فى الشكل 10-3 .

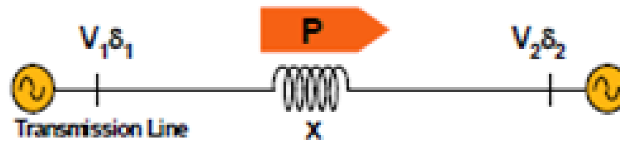


Figure 10-3 المعاملات المؤثرة على انتقال القدرة عبر خط نقل

والواقع أن هذه القدرة تتوقف أساسا على عدة عوامل. فإذا أخذنا فى الاعتبار محطتين لهما جهد V_2 and V_1 مربوطتين بخط نقل القدرة له معاوقة قدرها X ، والزاوية بين جهدى المحطتين هى δ_{12} التى تعرف بالـ Power Angle ، فإن القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين المحطتين تساوى :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

ويمكن تمثيلها بالمنحنى الموجود بالشكل 10−4 والذى منه نستنتج أن القدرة المنقولة تزيد مع زيادة الزاوية بين المحطتين تصل حدها الأقصى حين تكون الزاوية بين المحطتين تساوى 90 درجة لكن بالتأكيد لن نحاول الاقتراب من هذه القيمة لأن أى زيادة طفيفة فى الزاوية بعد 90 درجة ستنقلنا إلى منطقة عدم الاتزان والتى فيها تتناقص القدرة المنقولة مع زيادة الزاوية.

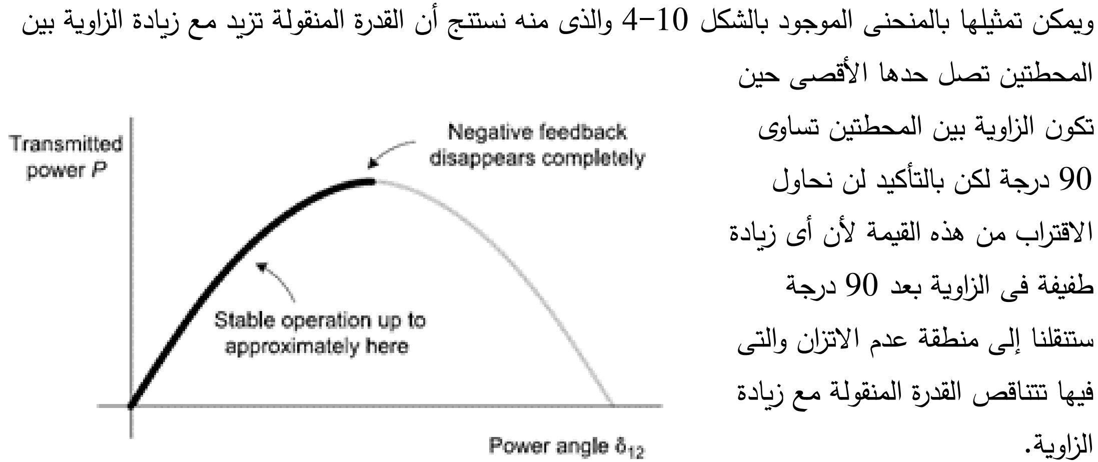


Figure 10-4 Stability margin

ومن المعادلة السابقة نستنتج أن القدرة المنقولة يمكن أن تزيد بعدة طرق منها:

1− زيادة جهد النقل وهذا يفسر استخدام الجهود العالية فى نقل القدرة الكهربية بالإضافة لما نعلمه جميعا من أن رفع الجهد سيخفض قيمة التيار فى الخطوط ومن ثم يخفض قيمة Power Losses مع ملاحظة أن رفع جهد خط بعد تركيبه يعتبر شبه مستحيل لأن ذلك يستلزم تغيير كافة العوازل على طول مسار الخط

2− زيادة قيمة الزاوية δ عن طريقة زيادة ضغط البخار الداخل للتربينة فى محطة التوليد لكن هناك حدود لهذه الزيادة كما ذكرنا Stability limit ويجب ألا تقترب من قيمة 90 درجة خوفا من عدم الاتزان.

3− ويمكن زيادة القدرة المنقولة عن طريق إنقاص قيمة X وهذا ممكن إما بإنشاء مثلا خط موازى فتقل قيمة X إلى النصف وبالتالى تزداد القدرة المنقولة إلى الضعف ، أو عمل Bundle conductors وهو أيضا ليس أمرا هينا . ويتبقى الحل الآخر وهو استخدام التكنولوجيا الجديدة المعروفة باسم FACTs كما سندرسها فى الفصل الأخير من هذا الباب للتحكم فى قيم X .

10.3.3 هل الخطوط القصيرة أفضل فى نقل الطاقة؟

فى الخطوط القصيرة ستكون قيمة X منخفضة وهذا يعنى أن القدرة المنقولة ستكون أكبر منها فى حالة الخطوط الطويلة ، لكن هذا الكلام ليس على إطلاقه ، وذلك لسببين :

- الأول أن المعادلة السابقة هى معادلة تقريبية نفترض فيها فرضا غير واقعى وهو أن الخط Lossless أى ليس له مقاومة ومن ثم لم يظهر تأثير المقاومة فى المعادلة.
- والسبب الثانى وهو مترتب على السبب الأول وهو أن هناك عنصر آخر يجب أن يؤخذ فى الاعتبار فى هذه الحسابات وهو ما نسميه الاتزان الحرارى أو Thermal Stability.

والاتزان الحرارى يقصد به أن تكون الحرارة المتولدة داخل أسلاك النقل نتيجة مرور التيار ($I^2 R t$) تساوى أو أقل من الحرارة المتبددة من الأسلاك فى الهواء وهذا يتوقف على قيمة التيار المار بالسلك ، وبالتالى فلا يمكن اعتبار أن الـ Stability limit قد ارتفع نتيجة أن قيمة X قد انخفضت فى الخطوط القصيرة ومن ثم يمكن زيادة القدرة المنقولة ، مالم نأخذ فى الاعتبار أيضا قيمة الـ Thermal Limit كما هو واضح فى الشكل 10-5 .

(القدرة المنقولة P_{12} تظهر فى الرسم كنسبة من الـ Surge Impeadance Load . (يمكن مراجعة مفهوم الـ SIL فى الفصل الأخير من هذا الكتاب).

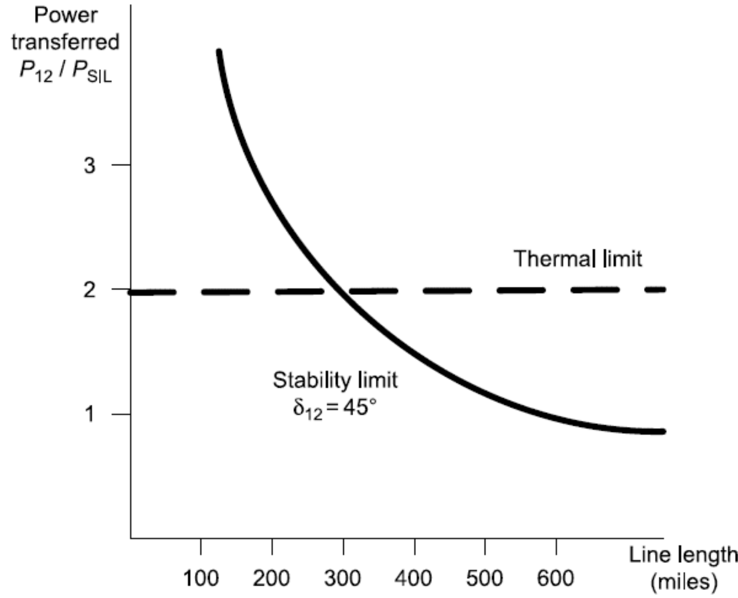


Figure 10-5 حدود قدرة الخط على نقل الطاقة

10.3.4 تأثير الـ Inductance على حدود القدرات غير فعالة

فى الجزء السابق تحدثنا عن نقل القدرة الفعالة عبر الخطوط ، لكن فى الواقع أن لدينا نوع آخر من القدرة المنقولة وهى القدرة غير الفعالة. فالقدرة الفعالة Active Power, P هى التى تتحول فى داخل الحمل إلى نوع آخر من الطاقة مثل أن تتحول إلى طاقة حركة فى المحركات أو طاقة حرارية فى السخانات وهكذا.

أما القدرة غير الفعالة Reactive Power, Q فهى قدرات تسحب من المولد فى النصف الأول من موجة الجهد ثم ترجع إليه مرة أخرى فى النصف الثانى ولذا تسمى أحيانا بالقدرة الاسترجاعية (أى التى ترجع مرة أخرى للمصدر) . ورغم أنها غير فعالة لأنها لا تتحول إلى صورة أخرى من صور الطاقة ، لكنها ضرورية لتغذية الدوائر المغناطيسية للمحولات والمحركات وخلافه ، فهى المسئولة عن توليد المجال المغناطيسي اللازم لعمل هذه الأجهزة. (مزيد من التفاصيل حول القدرة غير الفعالة فى الفصل التالى).

وهناك فرق جوهرى آخر بين القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ، وهو أن كمية واتجاه القدرة الفعالة فى أى خط يتحدد بالفرق بين الـ Phase Angles لجهدى الـ V_{Send} و $V_{Reciving}$ والتى سميناها سابقا بالزاوية δ ، فكلما

زادت هذه الزاوية زادت القدرة الفعالة المنقولة على الخط (بحد أقصى 90 درجة كما ذكرنا) ، كما يتحدد اتجاه مرور القدرة الفعالة بهذه الزاوية أيضا فيكون متجها من المحطة التى لها Phase angle أكبر من الأخرى ، ويتم تغيير هذه الزوايا بواسطة تغيير سرعة المولدات (راجع الباب الأول).

أما كمية واتجاه القدرة غير الفعالة فيتحدد حسب قيمة الجهد وبالتالى كلما زاد الفرق بين جهد المصدر وجهد الحمل كلما زادت القدرة غير الفعالة المارة بينهما ويكون اتجاه مرورها من الجهد الأعلى للأقل.

ومن السطرين السابقين يتبين ظهور مشكلة كبرى ، وهي أن انخفاض الجهد بسبب ارتفاع قيمة الـ Inductance سيؤدى إلى زيادة سحب القدرة غير الفعالة وهو ما سيؤدى إلى مزيد من الانحفاض فى الجهد بسبب الـ Voltage drop الناشئ عن مرور مزيد من تيارات القدرة غير الفعالة ، وربما نصل إلى مرحلة انهيار الجهد كما سنشرح ذلك تفصيلا فى الفصل التاسع والعشرين بالباب السادس .

10.4 سـعة الخطوط CAPACITANCE وتأثيراتها

مرور التيار يولد مجالا مغناطيسيا يتسبب فى ظهور الـ Inductance كما سبق ، وعلى الجانب الآخر فوجود فرق جهد بين موصلين ينشأ بينهما مجالا كهربيا ، وهذا المجال الكهربى إذا طبق على وسط عازل فإنه يتسبب فى تخزين كمية من الشحنات الكهربية فى هذا الوسط العازل (فكرة المكثف) ، وهذه الكمية تساوى Q حيث

$$Q = CV$$

بمعنى أن كمية الشحنات المخزنة Q تتناسب طرديا مع شدة الجهد V ، وهناك ثابت للتناسب هو ما اصطلح على تسميه بالـ Capacitance, C ، حيث تتوقف قيمتها على الأبعاد الهندسية بين الموصلات الحاملة للجهد وسماحية الوسط العازل لتخزين الشحنات ، وهذه السماحية Permability يرمز لها بالرمز ϵ_o فى حالة الهواء.

و الهواء هو أقل الأوساط العازلة سماحية للتخزين ، بينما المواد العازلة الأخرى لها سماحية تخزين تزيد عن سماحية الهواء بنسبة تساوى ϵ_r قد تصل قيمتها إلى 7 أو 8 أمثال سماحية الهواء .

والجدول التالى يعرض نماذج لقيم سماحية عوازل مختلفة مع عرض قيم الجهود التى يتحملها .

Insulating material	Dielectric constant or relative permittivity (e_r)	Dielectric Strength in kV/mm
Air	1.0006	3.2
Asbestos*	2	2
Bakelite	5	15
Epoxy	3.3	20
Glass	5-12	12-100
Marble*	7	2
Mica	4-8	20-200
Micanite	4-5-6	25-35
Mineral Oil	2.2	10
Mylar	3	400
Nylon	4.1	16
Paper	1.8-2.6	18
Paraffin wax	1.7-2.3	30
Polyethylene	2.3	40
Polyurethane	3.6	35
Porcelain	5-6.7	15
PVC	3.7	50
Quartz	4.5-4.7	8
Rubber	2.5-4	12-20
Teflon	2	20
Vacuum	1	infinity
Wood	2.5-7	---

والمعادلة التالية تعطى علاقة الـ Capacitance بأبعاد الموصلات

$$C = \frac{0.0121\varepsilon_r}{\log_{10}\frac{D}{r}}\,\mu F/km$$

وأحيانا تسمى هذه السعات غير المرئية بالمكثفات الذاتية Self Capacitance وتظهر هذه السعات طبقا للتعريف السابق بين كل Two Phases كما تظهر بين كل Phase والأرض ، وهذه الأخيرة تسمى بالمكثفات الشاردة Stay Capacitance وهى مكثفات غير مرئية وموزعة بانتظام على طول الخط ، وتتسبب فى مرور تيار متسرب من الخط إلى الأرض يسمى بالـ Stray Current أو الـ Capacitive Currents .

ومن أساسيات النقل الاقتصادي للتيار المتردد أن تكون السعة الكهربية Capacitance بين الخط الحامل للتيار وبين الأرضي صغيرة لتقليل الفقد في الكهرباء . ويمكن تنفيذ ذلك بزيادة ارتفاع الأبراج مثلا فى الخطوط الهوائية ، أما بالنسبة للكابلات عموما (لاسيما الكابلات البحرية التى تمتد عشرات الكيلومترات فالمشكلة أصعب حيث تكون سعة الكابلات كبيرة ، وبالتالي تزداد تكلفة نقل التيار المتردد ، وفى هذه الحالة يكون النقل باستخدام التيار المستمر أوفر اقتصاديا ، حيث لا يحدث فقد كبير.

وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة بالمكثف (Joule) W على حسب سعة المكثف ، وفرق الجهد عليه حسب المعادلة التالية:

$$W = 0.5\ CV^2$$

وبسبب وجود هذه المكثفات وهذه التيارات المتسربة ظهر مصطلح جديد هو الـ Admittance, Y .

10.4.1 مصطلح الــ Admittance, Y

هى مقياس لمدى سهولة مرور التيار بالدائرة وهى عكس المعاوقة Z وبالتالى يمكن أن تسميها المساهلة ، وحتى وحدات قياسها تكون عكس وحدات قياس المعاوقة Z والتى تقاس كما نعلم بالأوم ، ويرمز لها بالـ Ω ، أما الـ Admittance فتقاس بالـ mho والرمز يكون ℧ ، وأحيانا تقاس أيضا بالـ siemens

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \left(\frac{R}{R^2 + X^2}\right) + j\left(\frac{-X}{R^2 + X^2}\right)$$

or

$$Y = G + jB$$

where

Y is the admittance, measured in siemens (1/ohm).

G is the conductance, measured in siemens. Real part of admittance Y.

B is the susceptance , , measured in siemens , Imaginary part of admittance Y.

10.5 طرق تمثيل الخط رياضيا

جميع الحسابات المرتبطة بخطوط النقل تحتاج إلى تمثيل رياضى للخط ، وطريقة هذا التمثيل تتوقف على طول الخط ، حيث تقسم خطوط النقل إلى ثلاثة أنواع حسب الطول :

10.5.1 تمثيل الخطوط القصيرة :

الخطوط القصيرة Short TL ، والتى يكون طولها أقل من 80 كم ، يتم تمثيلها كـ Lumped Parameters ، أى بمعاوقة R + j X مجمعة كما فى الشكل 10-6 ، حيث R تمثل المقاومة الكلية

لموصلات الخط ، و X تمثل المعاوقة الحثية للخط كله ، وفى هذه الخطوط نهمل تأثير المكثفات الشاردة للخط.

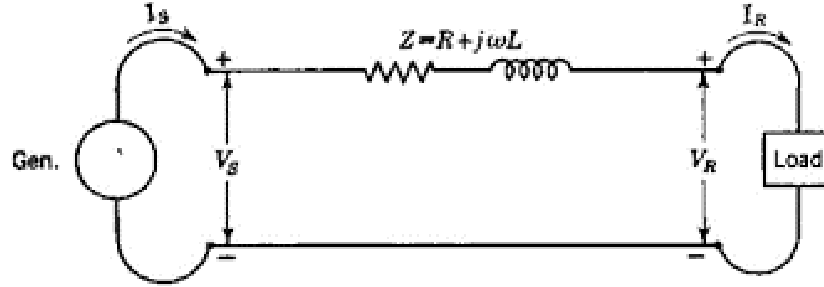


Figure 10-6 Short TL

والمثال التالى يعطى يظهر كيفية تأثير قيم عناصر التمثيل (R and L) على أداء الخط (الكفاءة وانتظام الجهد).

Example 10.3. *An overhead 3-phase transmission line delivers 5000 kW at 22 kV at 0·8 p.f. lagging. The resistance and reactance of each conductor is 4 Ω and 6 Ω respectively. Determine : (i) sending end voltage (ii) percentage regulation (iii) transmission efficiency.*

Solution.

Load power factor, $\cos\phi_R = 0{\cdot}8$ lagging

Receiving end voltage/phase,* $V_R = 22{,}000/\sqrt{3} = 12{,}700$ V

Impedance/phase, $\vec{Z} = 4 + j\,6$

Line current, $I = \dfrac{5000 \times 10^3}{3 \times 12700 \times 0\cdot8} = 164$ A

As $\cos\phi_R = 0{\cdot}8 \quad \therefore \sin\phi_R = 0{\cdot}6$

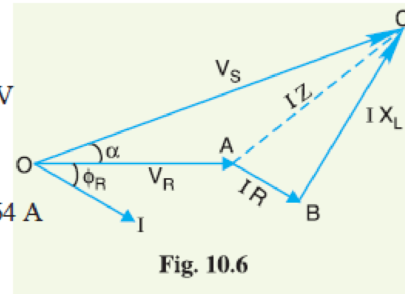


Fig. 10.6

Taking $\vec{V_R}$ as the reference phasor (see Fig. 10.6),

$$\vec{V_R} = V_R + j\,0 = 12700 \text{ V}$$

$$\vec{I} = I(\cos\phi_R - j\sin\phi_R) = 164\,(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6) = 131{\cdot}2 - j\,98{\cdot}4$$

(*i*) Sending end voltage per phase is

$$\vec{V_S} = \vec{V_R} + \vec{I}\,\vec{Z} = 12700 + (131{\cdot}2 - j\,98{\cdot}4)\,(4 + j\,6)$$
$$= 12700 + 524{\cdot}8 + j\,787{\cdot}2 - j\,393{\cdot}6 + 590{\cdot}4$$
$$= 13815{\cdot}2 + j\,393{\cdot}6$$

Magnitude of $V_S = \sqrt{(13815\cdot2)^2 + (393\cdot6)^2} = 13820{\cdot}8$ V

Line value of $V_S = \sqrt{3} \times 13820{\cdot}8 = 23938 \text{ V} = \mathbf{23{\cdot}938\ kV}$

(*ii*) % age Regulation $= \dfrac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 = \dfrac{13820\cdot8 - 12700}{12700} \times 100 = \mathbf{8{\cdot}825\%}$

(*iii*) Line losses $= 3I^2R = 3 \times (164)^2 \times 4 = 3{,}22{,}752 \text{ W} = 322{\cdot}752$ kW

$\therefore$ Transmission efficiency $= \dfrac{5000}{5000 + 322\cdot752} \times 100 = \mathbf{93{\cdot}94\%}$

10.5.2 تمثيل الخطوط متوسطة الطول

الخطوط متوسطة الطول Medium TL ، تكون بين 80 إلى 160 كم ، وتمثل :

1- إما بطريقة الـ Pi-Section أو بطريقة الـ T-Section ، حيث يظهر تأثير الـ Capacitance لكن بصورة مجمعة سواء فى منتصف الخط كما فى الـ T-model فى الشكل 10-7.

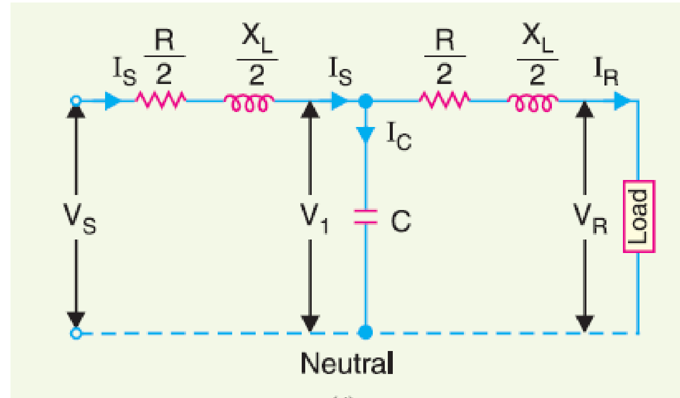


Figure 10-7 T-modle for Medium length TL

2- أو بتقسيم المكثفات إلى نصفين (كل نصف يمثل بضعف قيمة السعة الكلية للخط) ، كما فى الشكل 10-8 .

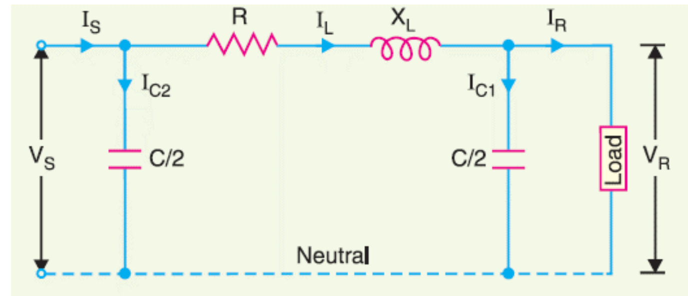


Figure 10-8 Pi-Modle

وهذا مثال لحسابات أداء الخط وتأثره بقيم التمثيل (R and L and C)

Example 10.11. *A 3-phase, 50-Hz overhead transmission line 100 km long has the following constants :*

Resistance/km/phase	$= 0.1\ \Omega$
Inductive reactance/km/phase	$= 0{\cdot}2\ \Omega$
Capacitive susceptance/km/phase	$= 0{\cdot}04 \times 10^{-4}$ *siemen*

Determine (i) the sending end current (ii) sending end voltage (iii) sending end power factor and (iv) transmission efficiency when supplying a balanced load of 10,000 kW at 66 kV, p.f. 0·8 lagging. Use nominal T method.

Solution. Figs. 10.13 (*i*) and 10.13 (*ii*) show the circuit diagram and phasor diagram of the line respectively.

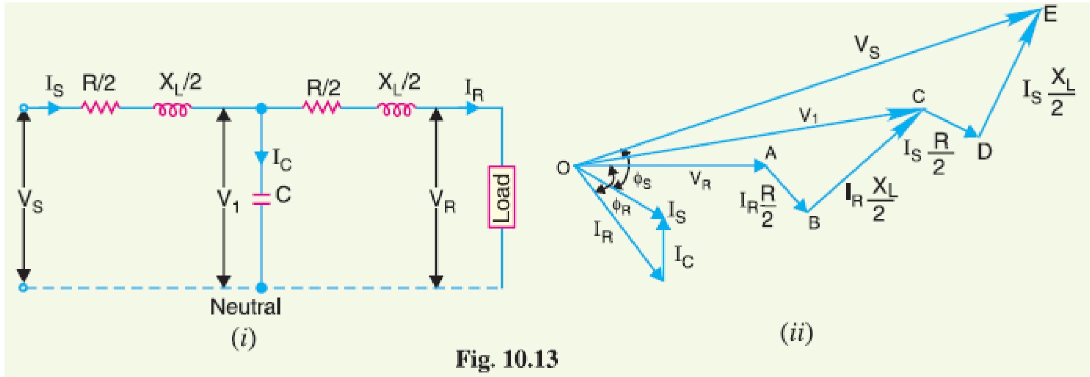


Fig. 10.13

Total resistance/phase, $R = 0{\cdot}1 \times 100 = 10\ \Omega$

Total reactance/phase. $X_L = 0{\cdot}2 \times 100 = 20\ \Omega$

Capacitive susceptance, $Y = 0{\cdot}04 \times 10^{-4} \times 100 = 4 \times 10^{-4}$ S

Receiving end voltage/phase, $V_R = 66{,}000/\sqrt{3} = 38105\ V$

Load current, $$I_R = \frac{10{,}000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 66 \times 10^3 \times 0{\cdot}8} = 109 \text{ A}$$

$$\cos \phi_R = 0{\cdot}8\ ; \quad \sin \phi_R = 0{\cdot}6$$

Impedance per phase, $\vec{Z} = R + j X_L = 10 + j\,20$

(*i*) Taking receiving end voltage as the reference phasor [see Fig. 10.13 (*ii*)], we have,

Receiving end voltage, $\vec{V_R} = V_R + j\,0 = 38{,}105\ V$

Load current, $\vec{I_R} = I_R (\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = 109\,(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6) = 87{\cdot}2 - j\,65{\cdot}4$

Voltage across C, $\vec{V_1} = \vec{V_R} + \vec{I_R}\,\vec{Z}/2 = 38,105 + (87{\cdot}2 - j\,65{\cdot}4)\,(5 + j\,10)$

$= 38{,}105 + 436 + j\,872 - j\,327 + 654 = 39{,}195 + j\,545$

Charging current, $\vec{I_C} = j\,Y\,\vec{V_1} = j\,4 \times 10^{-4}(39{,}195 + j\,545) = -0{\cdot}218 + j\,15{\cdot}6$

Sending end current, $\vec{I_S} = \vec{I_R} + \vec{I_C} = (87{\cdot}2 - j\,65{\cdot}4) + (-0{\cdot}218 + j\,15{\cdot}6)$

$= 87{\cdot}0 - j\,49{\cdot}8 = 100 \angle -29°47'$ A

∴ Sending end current $=$ **100 A**

(ii) Sending end voltage, $\vec{V_S} = \vec{V_1} + \vec{I_S}\,\vec{Z}/2 = (39{,}195 + j\,545) + (87{\cdot}0 - j\,49{\cdot}8)\,(5 + j\,10)$

$= 39{,}195 + j\,545 + 434{\cdot}9 + j\,870 - j\,249 + 498$

$= 40128 + j\,1170 = 40145 \angle 1°40'$ V

∴ Line value of sending end voltage

$= 40145 \times \sqrt{3} = 69\,533$ V $=$ **69·533 kV**

(iii) Referring to phasor diagram in Fig. 10.14,

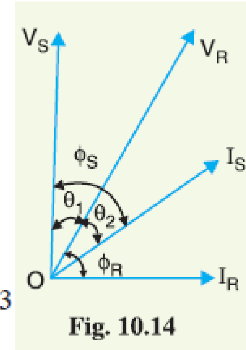


Fig. 10.14

θ_1 = angle between $\vec{V_R}$ and $\vec{V_S} = 1°40'$

θ_2 = angle between $\vec{V_R}$ and $\vec{I_S} = 29°\,47'$

∴ ϕ_S = angle between $\vec{V_S}$ and $\vec{I_S}$

$= \theta_1 + \theta_2 = 1°40' + 29°47' = 31°27'$

∴ Sending end power factor, $\cos\phi_S = \cos 31°27' =$ **0·853 lag**

(iv) Sending end power $= 3\,V_S I_S \cos\phi_S = 3 \times 40{,}145 \times 100 \times 0{\cdot}853$

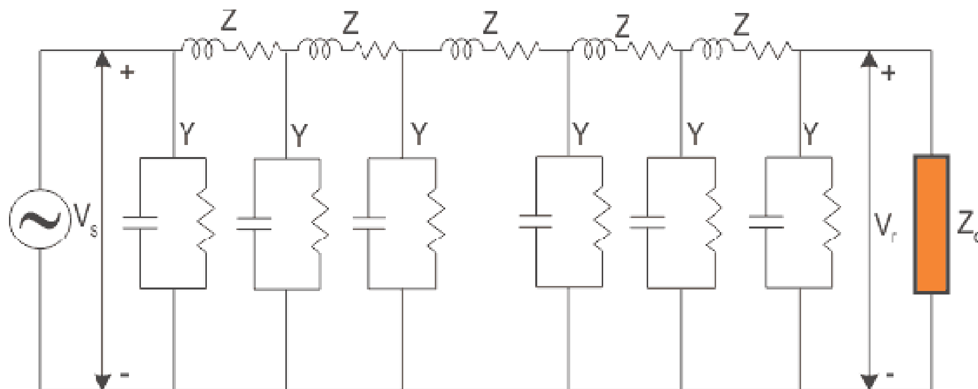
$= 10273105$ W $= 10273{\cdot}105$ kW

Power delivered $= 10{,}000$ kW

∴ Transmission efficiency $= \dfrac{10{,}000}{10273{\cdot}105} \times 100 =$ **97·34%**

10.5.3 تمثيل الخطوط الطويلة :

الخطوط الطويلة Long TL تكون أطول من 160 كم وتمثل بطريقة الـ Distributed parameters كما فى الشكل 10-9.



Long Transmission Line Model

Figure 10-9

والمعادلات التى تصف أداء هذه الخطوط تتسم بالدقة والتعقيد الرياضى فى وقت واحد ، فالخط هنا يمثل وكأنه مجموعات لانهائية العدد من Series Impedance, Z and Shunt Admittance,Y كما فى الشكل 10– 9 .

ويتم حساب قيم الجهد الذى يظهر على وحدة من هذه المجموعات ، ثم عمل تكامل Integration على طول الخط للوصول للجهد فى نهاية الخط ، وحيث أن الوحدة الصغيرة من هذه المجموعات تمثل بمعادلة تفاضلية Differential Equation من الدرجة الثانية ، و عند عمل تكامل لهذا النوع من المعادلات تنتج القيم المعروفة بـ Sinh and Cosh – وهما بالطبع يختلفان عن الـ Sin and Cos ولهما أزار خاصة على الآلة الحاسبة – ومن هنا نصل للمعادلات المشهورة الممثلة لهذه الخطوط ، وهذه المعادلات تعطى قيمة الجهد والتيار عند الـ (Supply End (V_S, I_S بدلالة Z, Y للخط ، وكذلك بدلالة التيار والجهد عند (Receiving End, (I_R, V_R كما فى المعدلتين التاليتين :

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R \cosh\sqrt{\mathbf{YZ}} + \mathbf{I}_R\sqrt{\frac{\mathbf{Z}}{\mathbf{Y}}}\sinh\sqrt{\mathbf{YZ}}$$

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{V}_R\sqrt{\frac{\mathbf{Y}}{\mathbf{Z}}}\sinh\sqrt{\mathbf{YZ}} + \mathbf{I}_R\cosh\sqrt{\mathbf{YZ}}$$

Example 10.15. *A 3-φ transmission line 200 km long has the following constants :*

$$\text{Resistance/phase/km} = 0{\cdot}16\ \Omega$$
$$\text{Reactance/phase/km} = 0{\cdot}25\ \Omega$$
$$\text{Shunt admittance/phase/km} = 1{\cdot}5 \times 10^{-6}\ S$$

Calculate by rigorous method the sending end voltage and current when the line is delivering a load of 20 MW at 0·8 p.f. lagging. The receiving end voltage is kept constant at 110 kV.

Solution :

Total resistance/phase, $R = 0{\cdot}16 \times 200 = 32\ \Omega$

Total reactance/phase, $X_L = 0{\cdot}25 \times 200 = 50\ \Omega$

Total shunt admittance/phase, $Y = j\,1{\cdot}5 \times 10^{-6} \times 200 = 0{\cdot}0003 \angle 90°$

Series Impedance/phase, $Z = R + j\,X_L = 32 + j\,50 = 59{\cdot}4 \angle 58°$

The sending end voltage V_S per phase is given by :

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{YZ} + I_R \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{ZY} \qquad \text{...}(i)$$

Now
$$\sqrt{ZY} = \sqrt{59{\cdot}4 \angle 58° \times 0{\cdot}0003 \angle 90°} = 0{\cdot}133 \angle 74°$$
$$ZY = 0{\cdot}0178 \angle 148°$$
$$Z^2Y^2 = 0{\cdot}00032 \angle 296°$$
$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{59{\cdot}4 \angle 58°}{0{\cdot}0003 \angle 90°}} = 445 \angle -16°$$
$$\sqrt{\frac{Y}{Z}} = \sqrt{\frac{0{\cdot}0003 \angle 90°}{59{\cdot}4 \angle 58°}} = 0{\cdot}00224 \angle 16°$$

$$\therefore \quad \cosh\sqrt{YZ} = 1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2Y^2}{24} \text{ approximately}$$
$$= 1 + \frac{0{\cdot}0178}{2} \angle 148° + \frac{0{\cdot}00032}{24} \angle 296°$$
$$= 1 + 0{\cdot}0089 \angle 148° + 0{\cdot}0000133 \angle 296°$$
$$= 1 + 0{\cdot}0089\,(-0{\cdot}848 + j\,0{\cdot}529) + 0{\cdot}0000133\,(0{\cdot}438 - j\,0{\cdot}9)$$
$$= 0{\cdot}992 + j\,0{\cdot}00469 = 0{\cdot}992 \angle 0{\cdot}26°$$

$$\sinh\sqrt{YZ} = \sqrt{YZ} + \frac{(YZ)^{3/2}}{6} \text{ approximately}$$
$$= 0{\cdot}133 \angle 74° + \frac{0{\cdot}0024 \angle 222°}{6}$$
$$= 0{\cdot}133 \angle 74° + 0{\cdot}0004 \angle 222°$$
$$= 0{\cdot}133\,(0{\cdot}275 + j\,0{\cdot}961) + 0{\cdot}0004\,(-0{\cdot}743 - j\,0{\cdot}67)$$
$$= 0{\cdot}0362 + j\,0{\cdot}1275 = 0{\cdot}1325 \angle 74°6'$$

Receiving end voltage per phase is

$$V_R = 110 \times 10^3/\sqrt{3} = 63508 \text{ V}$$

Receiving end current,
$$I_R = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 110 \times 10^3 \times 0{\cdot}8} = 131\ A$$

Putting the various values in exp (i), we get,

$$\begin{aligned} V_S &= 63508 \times 0{\cdot}992 \angle 0{\cdot}26° + 131 \times 445 \angle -16°0' \times 0{\cdot}1325 \angle 74°6' \\ &= 63000 \angle 0{\cdot}26° + 7724 \angle 58°6' \\ &= 63000\,(0{\cdot}999 + j\,0{\cdot}0045) + 7724\,(0{\cdot}5284 + j\,0{\cdot}8489) \\ &= 67018 + j\,6840 = 67366 \angle 5°50'\ \text{V} \end{aligned}$$

Sending end line-to-line voltage $= 67366 \times \sqrt{3} = 116{\cdot}67 \times 10^3\ \text{V} =$ **116·67 kV**

The sending end current I_S is given by :

$$I_S = V_R \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{Y\,Z} + I_R \cosh \sqrt{Y\,Z}$$

Putting the various values, we get,

$$\begin{aligned} I_S &= 63508 \times 0{\cdot}00224 \angle 16° \times 0{\cdot}1325 \angle 74°6' + 131 \times 0{\cdot}992 \angle 0{\cdot}26° \\ &= 18{\cdot}85 \angle 90°6' + 130 \angle 0{\cdot}26° \\ &= 18{\cdot}85\,(-0{\cdot}0017 + j\,0{\cdot}999) + 130\,(0{\cdot}999 + j\,0{\cdot}0045) \\ &= 129{\cdot}83 + j\,19{\cdot}42 = 131{\cdot}1 \angle 8°\ \text{A} \end{aligned}$$

$\therefore$ Sending end current = **131·1 A**

10.6 الظواهر التى تترتب على وجود الـ CAPACITANCE فى الخطوط

هناك عدة ظواهر ترتبط جميعا بوجود المكثفات الشاردة منها :

- ظاهرة Ferranti Effect
- ظاهرة ارتفاع الجهد نتيجة حدوث قصر Over Voltages
- ظاهرة الـ Arcing Ground
- ظاهرة التيارات الشاردة Stray Currents

وفيما يلى نقدم شرحا لهذه الظواهر .

10.6.1 ظاهرة Ferranti Effect

هذه هى أولى الظواهر التى تنشأ بسبب الـ Stray Capacitance . معلوم أن التيار يسير من الجهد الأعلى للأقل وهذا بالضرورة يعنى أن جهد المصدر لابد أن يكون دائما أعلى من جهد الحمل حتى يسير التيار من المصدر للحمل ، ولكن أحد العلماء Sir S.Z. Ferranti, in the year 1890 اكتشف ظاهرة فريدة وهى ارتفاع الجهد عند الحمل أكثر من الجهد عند المصدر ، وذلك يحدث فى الخطوط المتوسطة الطول والطويلة عند انخفاض الأحمال وسميت الظاهرة باسمه Ferranti Effect

تحدث هذه الظاهرة إذا زادت قيمة التيار المسحوب بواسطة المكثفات الشاردة لخط النقل عن قيمة التيار المسحوب بواسطة الحمل فى نهاية الخط (هذا بالطبع لايمكن أن يحدث إلا عند انخفاض الأحمال بشدة على

سبيل المثال قبل صلاة الفجر مثلا) بحيث أن التيار المار فى الخط يكون Leading Voltage بزاوية 90 درجة تقريبا كما فى الشكل 10-10.

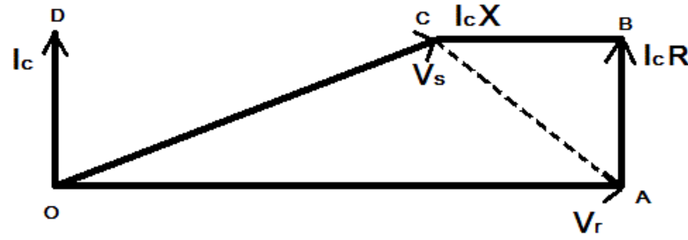


Figure 10-10 Ferranti Effect

ومعلوم أن تيار المكثف يسبق الجهد ومن ثم يصبح الـ Voltage drops على مقاومة الخط وعلى الـ Inductance كما فى الشكل 10-10. مما يجعل V_S يصبح أقل من V_R وتحدث ظاهرة الـ Ferranti Effect .

بالطبع هذه الظاهرة غير موجودة فى الخطوط القصيرة لصغر قيمة الـ Stray Capacitance بها.

والمعادلة التالية تعطى قيمة الارتفاع فى الجهد بدلالة طول الخط والـ Inductance (لاحظ أنه الارتفاع يتناسب مع مربع الطول).

$$Voltage\,rise = \left(\tfrac{1}{2}\right) V_r \omega^2 l^2 c_0 L_0$$

تجدر الإشارة إلى أن هذه الظاهرة تكون أشد وضوحا إذا كان خط النقل عبارة عن كابلات أرضية حيث تأثير الـ Capacitance تكون أكبر بكثير من الخطوط الهوائية .

10.6.2 ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر فى الشبكات المعزولة

معلوم أن حدوث قصر يتسبب فى ارتفاع التيار وانخفاض الجهد ، لكن هناك بعض الحالات التى يتسبب فيها القصر فى ارتفاع الجهد على Healthy Phases نتيجة عطل على Faulty Phase كما هو واضح فى الشكل 10-11 .

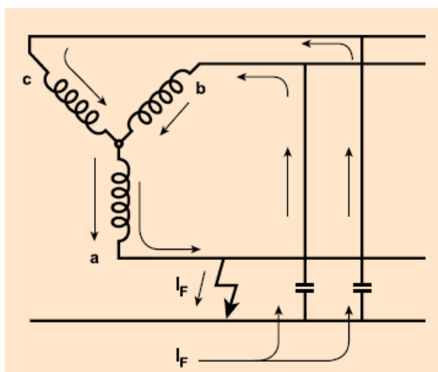


Figure 10-11

فقبل حدوث العطل كان الجهد على كل وجه يساوى Phase Voltage كما فى الـ Phasor Diagram المرسوم بالشكل 10–12 ، وبالتالى كان جهد نقطة التعادل يساوى صفر .

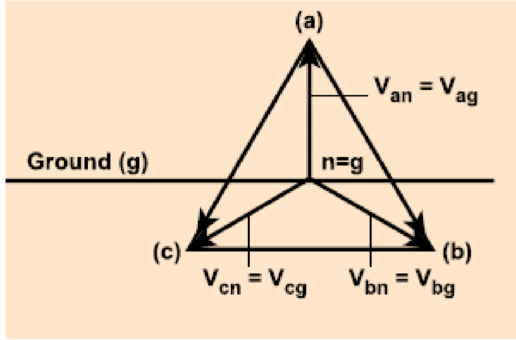


Figure 10-12

ثم عند حدوث القصر يعود تيار العطل فى طريق رجوعه من خلال مكثفات الـ Healthy Phases كما فى الشكل 10–11 ويرتفع جهد نقطة التعادل المعزولة إلى ما يساوى Phase Voltage (بقيمة سالبة كما فى الشكل 10–13) لأن جهد Phase–a هو الذى يساوى صفر بعد العطل. .

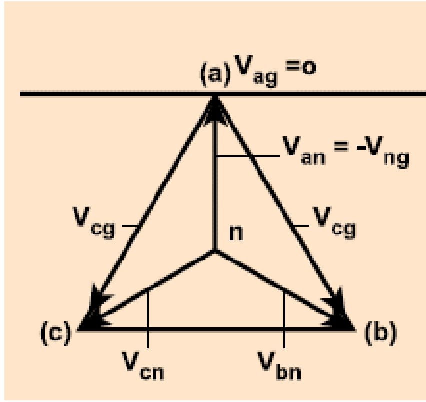


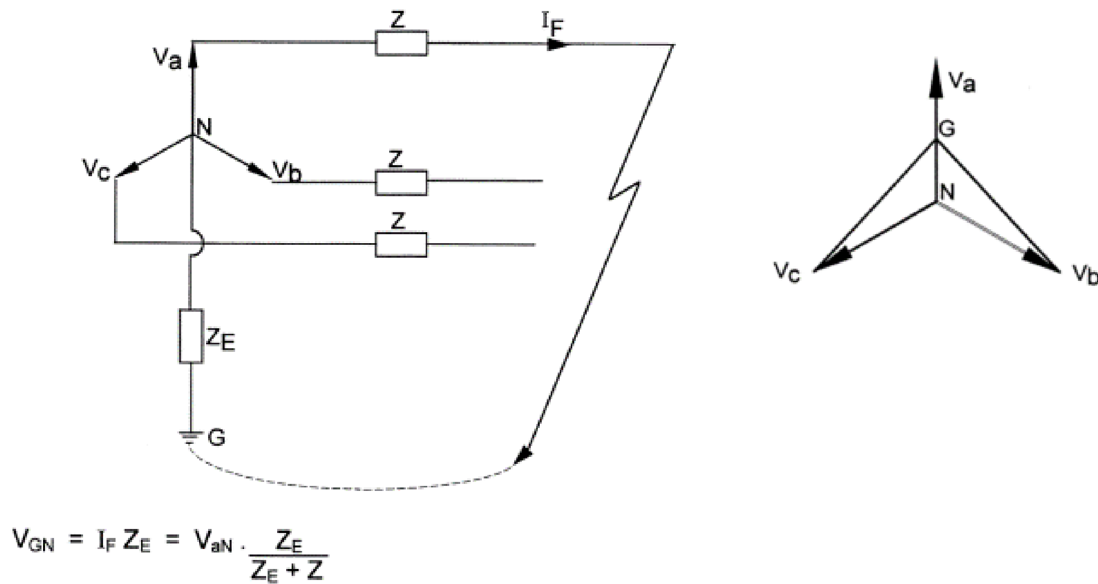
Figure 10-13

وبناء عليه يصبح الجهد على الـ Other two phases يساوى الـ Line voltage

$(V_{bn} = V_b - V_n = V_b - (-V_a) = B_{ba} = V_{line})$

أى أن عوازل الخط لهذه الـ Phases يجب أن تتحمل جهد يساوى هذا الجهد الجديد.

أما الخطوط غير المعزولة فتعانى من نفس لظاهرة لكن فقط عندما تكون نقطة التعادل مؤرضة كما فى الشكل 10–14 حيث تزحزحت نقطة التعادل من النقطة N إلي النقطة G وبالتالى انخفض الجهد على الـ Phase–A ليصبح $V_A - V_G$ بينما ارتفع على الفازتين الآخريين كما فى الجزء الأيمن من الشكل.



$$V_{GN} = I_F Z_E = V_{aN} \cdot \frac{Z_E}{Z_E + Z}$$

Figure 10-14 زحزحة نقطة التعادل لأعلى

ويترتب على ظهور هذا الجهد ليس فقط تأثر العوازل بل هناك ما هو أسوأ وهو ظاهرة الـ Arcing Ground.

10.6.3 ظاهرة الـقوس الأرضي Arcing Ground

تحدث هذه الظاهرة عند سقوط خط يحمل جهدا على الأرض فى نظام معزول (نقطة التعادل غير مؤرضة) ، فعند حدوث عطل أرضي على أحد الـ phase فإن المسار الوحيد لمرور تيار العطل ليكمل closed circuit هو الـ capacitance الخاصة بالخطوط كما فى الشكل 10-11 السابق .

ولعل بعضنا قد رأى يوما خطا كهربيا يقفز فى الهواء وكان شخصا يمسك بطرفه ويحركه لأعلى وأسفل ، وبالطبع لا أحد يمسك به وإنما كل ما حدث أن الخط بمجرد أن يقترب من الأرض تتكسر عازلية الهواء بينه وبين الأرض بسبب قرب المسافة فيحدث تفريغ لشحنات المكثفات الشاردة على الـ Healthy Phases وترى بعينك شررا بين السلك والأرض ، ثم يسقط السلك على الأرض فيمر تيار القصر المرتفع الخاص بالوجه المعطل إلى الأرض فيتنافر مع الأرض حسب شدة التيار ثم يتكرر الوضع .

وقد لا يكون تيار العطل عاليا بسبب مقاومة الأرض – بل غالبا سيكون تيار العطل صغيرا جداً لارتفاع معاوقة هذه المكثفات ، ومن ثم يمكن للنظام أن يستمر في العمل فى وجود هذا العطل لفترة ، ونقول أننا في حالة system floating ، لكن تيار العطل الصغير هذا يكون كافيا كى تعود المكثفات إلى الشحن مرة أخرى بعد تنافر السلك مع الأرض وارتفاعه لأعلى ، ويتكرر الوضع بين شحن وتفريغ للمكثفات ولا يستقر السلك على الأرض بل يقفز عشوائيا فى كل الاتجاهات طالما أن السلك لايزال متصلا بمصدر الطاقة وطالما أن الـ CB لم يفتح الدائرة.

وأخطر مافى هذه الظاهرة – بالإضافة للخطر على البشر – هو أن ينتج عنها ارتفاع فى الجهد على الخط يصل إلى 5 أمثال جهد الخط مما قد يتسبب فى انهيار العوازل.

وبسبب وجود إحتمال لحدوث ارتفاع كبير في الجهد over voltage ، فإن هذه الجهود العالية يمكن أن تؤدي لحدوث عطل أرضي آخر على عوازل برج آخر ، ومن ثم ينشأ مسار جديد يسمح بمرور تيار العطل الأول خلاله لكنه يتميز بمقاومة منخفضة هذه المرة مقارنة بمقاومة المكثفات الشاردة التى كان يمر خلالها قبل حدوث العطل الثانى ، ومن ثم ترتفع قيمة تيار العطل الأول بشدة ، ويتسبب في مخاطر كبرى ، ولذلك تكون تكلفة الصيانة أحيانا في هذا النوع من الأعطال مرتفعة جدا .

والحل الوحيد لهذه الظاهرة هو إيجاد مسار لمرور تيار العطل بدلا من المرور على المكثفات كما فى النظم المؤرضة عند نقطة التعادل حيث أن الدائرة للعطل ستكتمل بعيدا عن مكثفات الـ Phases السليمة.

11
تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة

Reactive Power Compensators

فى بدايات شبكات الكهرباء لم يكن هناك حاجة لاستخدام ما يعرف الآن باسم الـ Static VAR Compensators بأنواعها المتعددة ، إذ كانت الأحمال مجاورة للتوليد ولا يوجد أحمال حثية كثيرة ، بل كانت معظم الأحمال إما إنارة أو تسخين ، وكانت الأحمال تتصل بخطوط قصيرة بالمصدر ، ومن ثم فلم يشعر أحد بمشاكل الـ Reactive Power والتى ظهرت مع تغير هذه الظروف فصار لدينا أحمال حثية ضخمة تحتاج لسحب كميات هائلة من الـ Q قد لا تستطيع المولدات الموجودة فى الخدمة إمداد الأحمال بها ، لأن زيادة القدرة الغير فعالة المولدة من المولد تعنى نقص القدرة الفعالة ، وبالتالى نقص الـ Powe factor كما هو واضح من العلاقة المشهورة بين P–Q curve والتى ستظهر لاحقا فى الشكل 11–9 ، ومن ثم نلجأ إلى المصدر الآخر للقدرة غير الفعالة وهو إما المكثفات ، أو باستخدام أجهزة الـ STATCOM .

11.1 مفاهيم أساسية

وقبل الحديث عن هذه الأجهزة نراجع باختصار بعض المعلومات الأساسية المتعلقة بالقدرة غير الفعالة فى الخطوط (يمكن تجاوز هذا القسم لبعض المهندسين حيث المحتوى يمثل بالنسبة للبعض معلومات أولية).

11.1.1 تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربية

معظم الأجهزة الكهربية التي تعمل على التيار المتردد (مثل المحركات والمحولات و..) تستهلك نوعين من الطاقة الكهربية :

1- الأولى قدرة فعالة (ACTIVE POWER) وتقدر بالـ (kW) وهذه يستهلك جزء صغير منها عبر المقاومة الأومية(R) للملفات ، والجزء الأكبر يتحول فعليا إلى طاقة أخرى مفيدة (حركية مثلا خلال المحركات أو ضوء كما فى اللمبات وهكذا) ، ولذا تسمى بالقدرة الفعالة أو الحقيقية.

2- والثانية قدرة غير فعالة (REACTIVE POWER) وتقدر بالـ(KVAR) وهذه لا تستهلك ولا تتحول لصورة أخرى بل تتردد ذهابا وإيابا بين المصدر وبين الحمل من خلال خطوط التوصيل بينهما وتقوم داخل الحمل بمهمة إنشاء المجال المغناطيسي المطلوب لعمل هذه الأجهزة.

3- وعند جمع هاتين القدرتين إتجاهيا ينتج لدينا القدرة الظاهرية Apparent Power (S) وتقدر بالـ (KVA) كما فى المثلث المعروف بمثلث القدرة شكل 11-1.

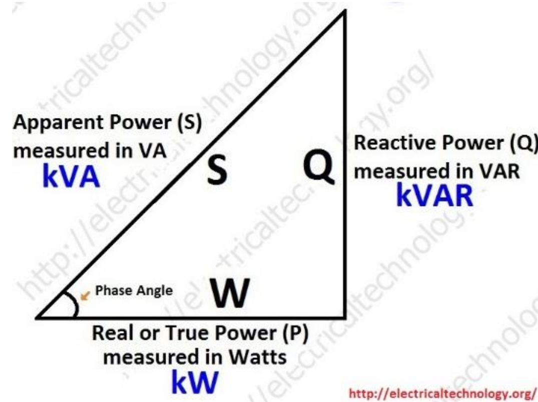


Figure 11-1 مثلث القدرة

ويمكن تقريب الأمر بصورة توضيحية ، فلو تخيلنا أن لدينا صندوقا مغلقا به حمل كهربى electric load ومتصل به سلكين يمر خلالهما التيار الكهربى ، فلو أنك باستخدام أى Multi-meter قمت بقياس الجهد والتيار الداخلين للجهاز ثم حسبت حاصل ضربهما فستحصل على ما نسميه القدرة الظاهرة Apparent Power ، وتعنى كما نقول باللغة الدارجة أن الظاهر أن القدرة الداخلة لهذا الجهاز المغلق تساوى كذا VA ، وهذا مصطلح دقيق لأنها فعلا قدرة ظاهرية أما الواقع فإنها داخل هذا الصندوق ستنقسم إلى جزئين أحدهما يمثل القدرة الفعالة P والآخر يمثل القدرة غير فعالة Q ، والنسبة بينهما تحدد ما يعرف بالـ Power Factor.

11.1.2 مفهوم معامل القدرة Power Factor

فى مثلث القدرة تسمى الزاوية بين الـ P وبين الـ Q بزاوية القدرة Power Angle ويكون Cos هذه الزاوية مساويا لنسبة القدرة الحقيقية أو الفعالة (P) إلى القدرة الظاهرية (S) ، وهو ما يسمى بمعامل القدرة POWER FACTOR .

وكلما كانت Q أقل كلما كانت زاوية القدرة صغيرة وهذا يعنى أن معامل القدرة سيكون كبيرا ويقترب من الواحد وبالتالى تكون القدرة الفعالة المفيدة المستهلكة أكبر وهذا ما نسعى إليه. وكلما كانت Q كبيرة كلما كان معامل القدرة صغيرا وهذا يعنى أننا لن نحصل سوى على قدرة حقيقية فعالة إلا بقدر صغير من إجمالى القدرة الظاهرة

S التى تغذى الحمل. ومن هنا كان معامل القدرة PF مؤشرا على ارتفاع كفاءة الاستفادة من القدرة المتاحة على الشبكة تماما كما لو تخيلنا زاوية الحبل الذى يشده الحصان فى الشكل 11−2 ، فكلما اقتربت الزاوية من الصفر كلما استفدت من قوة الحصان بأقصى صورة بينما لو جعلت الزاوية 90 درجة فلن تتحرك العربة ولن تحصل على أى قوة من الحصان.

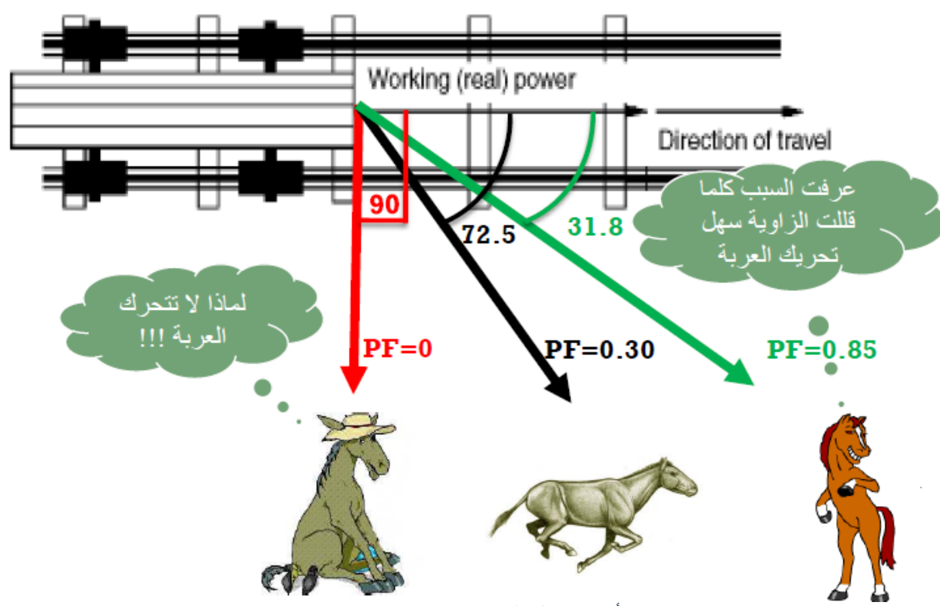


Figure 11-2 تأثير معامل القدرة

وعند إعداد دراسة لإنشاء محطة توليد أو محطة توزيع بقدرة مثلاً (1000kVA) لتأمين التغذية الكهربية لمنطقة عامل القدرة لها بحدود (P.F=0.8) فإن المولد أو المحول سيكون قادرا على تأمين قدرة فعالة قدرها فقط (P=0.8X1000=800 KW) لأنه سيحتاج لتأمين النوع الثانى من القدرة وهو القدرة غير فعالة .

أما عندما يكون معامل القدرة بحدود (P.F=0.5) فإن هذه المولد أو المحول لن يكون قادرا إلا على تأمين قدرة فعالة فقط بحدود.(P=500KW)

11.2 القدرة غير فعالة REACTIVE POWER

هذا المصطلح يظهر دائما إذا كانت الأحمال التى لديك تشتمل على مكثفات أو ملفات ، أما إذا كانت الأحمال عبارة عن مقاومات فقط فعندها لن يكون لدينا سوى نوع واحد من القدرة وهو القدرة الفعالة Active Power أو أحيانا تسمى القدرة الحقيقية Real Power .

ففى حالة الـ Resistive Loads يكون الجهد والتيار In-phase كما فى الشكل 11−3، ومن ثم يكون حاصل ضربهما وهو القدرة (P = VxI) موجبا دائما كما فى الشكل .

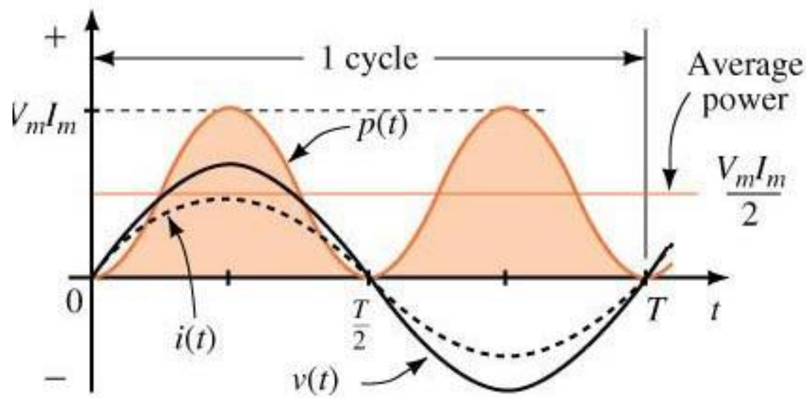


Figure 11-3 الجهد والتيار فى مقاومة أومية

ويمكن القول أن كل القدرة الكهربية القادمة من المصدر قد تحولت إلى قدرة فعالة Active داخل الحمل ، فقد تكون تحولت مثلا إلى حرارة أو إلى ضوء أو أى صورة من صور تحويل الطاقة.

أما فى حالة وجود ملفات فقط أو مكثفات فقط فى الدائرة الكهربية الموصلة على مصدر للتيار المتردد فإن هناك Phase Shift بين الجهد والتيار قدرة 90 درجة (التيار يسبق Lead الجهد فى حالة المكثفات ، ويكون متأخرا عنه Lag فى حالة الملفات).

ونتيجة هذا الـ Phase Shift فإن حاصل ضرب الجهد فى التيار تصبح موجبة فى أول ربع دورة فى حالة المكثف ثم سالبة ثم موجبة ثم سالبة فى الربع الأخير كما فى الشكل 11−4. والعكس صحيح فى حالة الملفات كما فى الشكل 11−5 .

وهذا يعنى أن المكثف / الملف يختزن الطاقة المسحوبة من المصدر خلال ربع الدورة ثم يردها ثانية للمصدر خلال ربع الدورة التالى ، ويتكرر ذلك خلال ربعى الدورة الثالث والرابع . وتصبح متوسط القدرة P المسحوبة خلال دورة كاملة يساوى صفر.

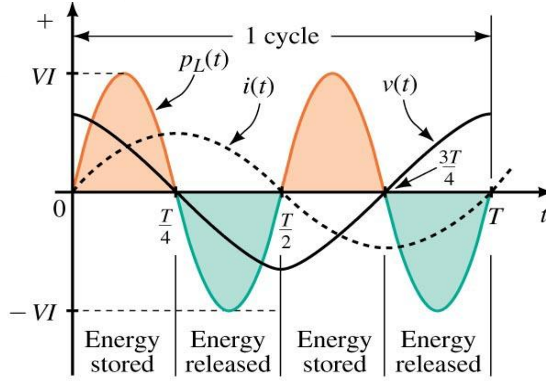


Figure 11-4 الجهد والتيار والقدرة فى الملفات

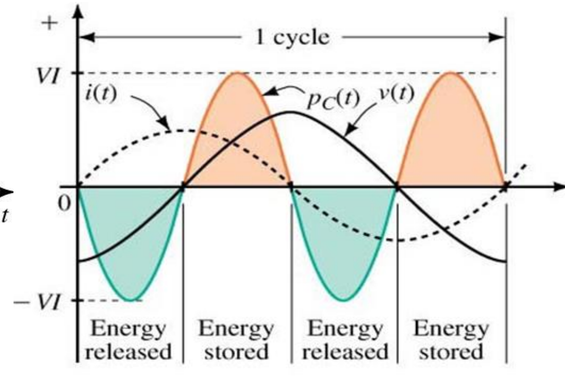


Figure 11-5 الجهد والتيار والقدرة فى المكثفات

و كما هو واضح من الشكلين فإن متوسط القدرة P المسحوبة من المصدر خلال دورة كاملة يساوى الصفر فى حالتى المكثف والملف ، ومن هنا أطلق على هذا النوع من القدرة التى تسحب بواسطة ملفات أو مكثفات اسم القدرة غير فعالة Reactive Power, Q لأنها فى الإجمال لم تؤد أى شغل ولم تتحول إلى أى صورة أخرى مفيدة بل كل مافعلته (فى الظاهر حتى الآن) أنها تمر خلال الأسلاك بين المصدر والحمل ذهابا وإيابا متسببة فى مرور تيار إضافى فى الأسلاك وهذا التيار الإضافى سيتسبب فى حدوث Voltage drop على الخط ومن ثم ينخفض الجهد عند الأحمال ، بالإضافة إلى تسببها فى حدوث فقد فى الطاقة خلال مقاومة الأسلاك الواصلة للحمل (لاحظ أن القدرة الفعالة الوحيدة التى ظهرت هى القدرة المفقودة فى الأسلاك ولا علاقة لها بالملفات أو المكثفات).

وأحيانا يطلق على الـ Q القدرة السالبة أو التخيلية والسبب واضح من الأشكال السابقة ، ففى حالة القدرة الفعالة Active Power, P فإن القدرة متغيرة القيمة لكنها دائما موجبة بينما فى حالة القدرة غير فعالة Q فإن جزء منها موجب والجزء الآخر سالب كما فى الشكل 4−11 و 5−11، وبالطبع ليس معنى القدرة السالبة أو التخيلية أنها غير موجودة بالواقع ، بل يعنى أن اتجاهها قد تغير ليصبح من الحمل إلى المصدر.

بالطبع لايوجد فى الواقع العملى أحمال عبارة عن Coils فقط أو مكثفات فقط وإنما يكون مع كل منهم مقاومة ما ومن ثم فالقدرة المسحوبة بواسطة الملف أو المكثف لن تكون كلها Q كما فى الشكل السابق بل سيكون جزء منها يعتبر P وجزء آخر يعتبر Q وتختلف نسبة كل جزء منهما حسب نوع الحمل. والشكل 6−11 يمثل الصورة الواقعية للقدرة الفعالة وغير الفعالة المسحوبة بواسطة حمل مكون من ملف ومقاومة.

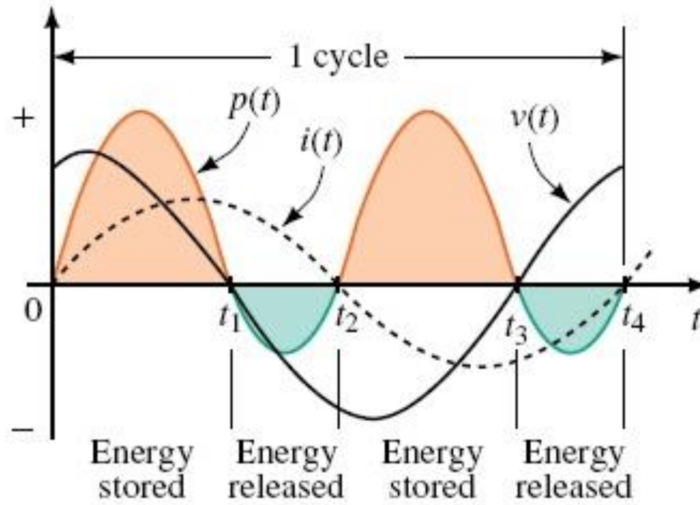


Figure 11-6

11.2.1 هل القدرة غير فعالة لافائدة لها؟

كما ذكرنا فإن القدرة غير فعالة ليس لها فائدة مباشرة كما يبدو فى الظاهر، فهى تتردد ذهابا وإيابا بين المصدر والحمل ومن ثم تتسبب فى حدوث هبوط فى الجهد بسبب تيار القدرة غير فعالة المار بالخط ذهابا وإيابا ، ولكن القدرة غير الفعالة أساسية لعمل الكثير من الأجهزة ، كما فى المثال التالى:

فالعربة تحتاج لقوة دفع أمامية (وهو ما يكافئ P) لكن لو صرفنا جزءا من قوتنا لرفع العربة لأعلى قليلا (وهو ما يكافئ Q) فسيكون دفع العربة أسهل كثيرا (شكل 11-7) .
وهذا بالفعل دور الـ Q فهى لا تدفع العربة ولكن تساعد فى دفعها وهى كهربيا لا تتحول إلى قدرة ملموسة (حركة مثلا فى المحركات) ولكنها تساهم فى إنتاج هذه الحركة من خلال إنتاجها للمجال المغناطيسي والذى بدونه لن يتحرك الموتور.

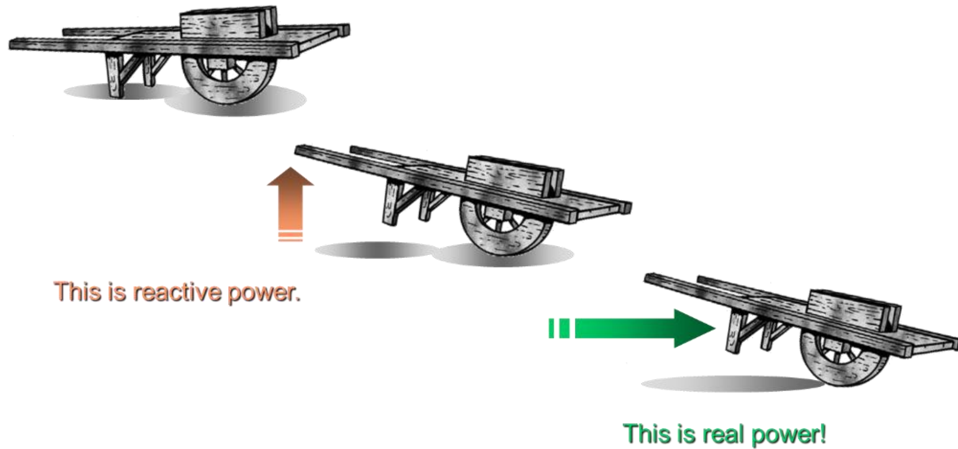


Figure 11-7 تأثير القدرة غير الفعالة

وهناك مثال طريف آخر لشرح مفهوم القدرة غير فعالة من خلال كيس الشيبسي فى الشكل 11-8 .
فالجزء الفعال أو المفيد هو الجزء السفلى المحتوى على رقائق البطاطس ، لكن الشركة مضطرة أن تضيف جزءا فارغا مملوءا بالهواء (فعليا يملأ بالنتروجين حتى لا تصبح القطع لينة) ، فهذا تماما هو دور القدرة غير فعالة لا تفيد مباشرة لكنها ضرورية بصورة غير مباشرة.

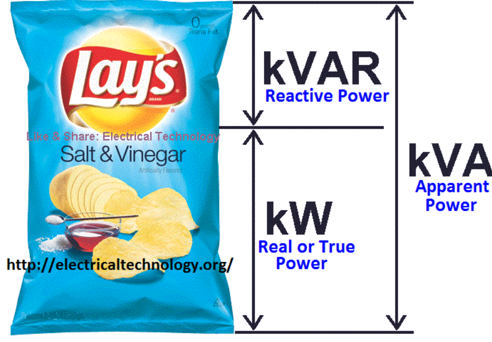


Figure 11-8

11.2.2 إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power

جميع المعدات الكهربية التى تحتوى على ملفات تعتبر مستهلكة لـ Q مثل المحركات والمحولات .

أما المعدات التى تنتج الـ Q فهما مصدران : الأول هو المولدات Synchronous Generators والثانى هو المكثفات.

- علما بأن المولدات يمكن أن تكون منتجة للـ Q إذا كان فى حالة Over Excited ، كما يمكن أن تكون مستهلكة لـ Q فى حال كونها Under excited . (شكل 11-9)
- أما خطوط النقل / كابلات فهى تعتبر مستهلكة لـ Q فى حال كونها محملة Loaded بأعلى من Surge Impedance Load, SIL وتعتبر منتجة لـ Q إذا كان تحميلها خفيف وأقل من SIL كما سنشرح لاحقا فى الباب السادس. ونعرض ملخصها هنا:

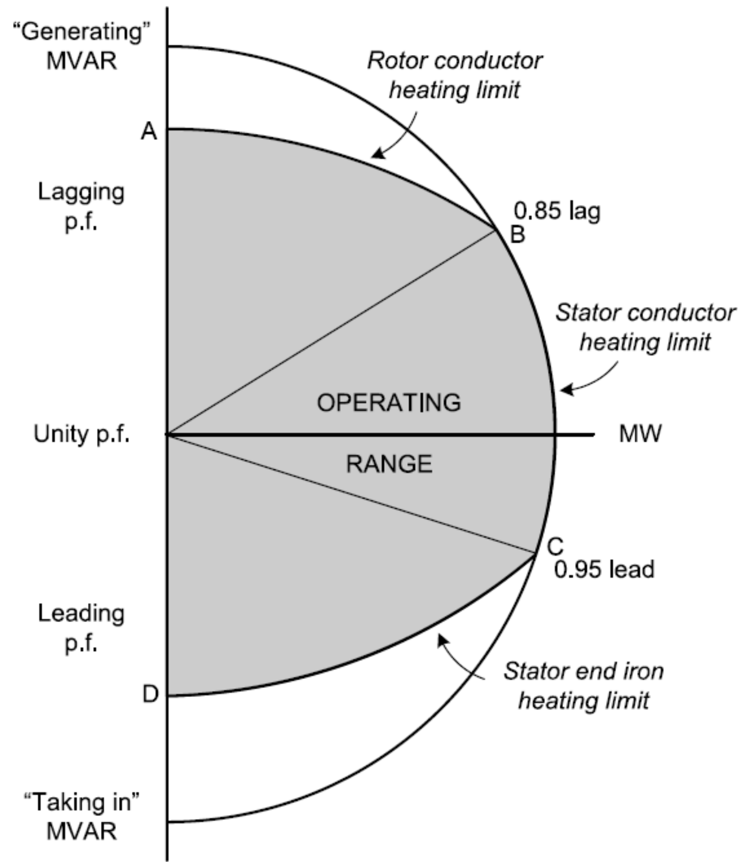


Figure 11-9 Generator P-Q curve with different PF

11.3 ماهو مفهوم الـ SURGE IMPEDANCE LOADING, SIL ؟

معلوم أن خط النقل يولد Reactive Power من خلال مكثفات الخط الطبيعية Self Capacitance وكمية الـ Q المنتجة بواسطة هذه المكثفات تساوى

$$MVAR\ (Produced) = \frac{kV^2}{X_C}$$

أيضا هذه الخطوط تحتاج لسحب Reactive Power لتوليد المجال المغناطيسي المصاحب للخط من خلال الـ Self Inductance الخاصة بالخط ، وهذه القدرة الغير فعالة المسحوبة تساوى I^2X_L.

وعندما تكون Q (used) = Q (Supplied) فهذا يعني أن

$$I^2X_L = \frac{V^2}{X_C}$$

ومنها نجد أن

$$X_L X_C = \frac{V^2}{I^2}$$

ومنها نحصل على العلاقة المعروفة

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Surge Impedance} = Z_o$$

إذن فالحالة السابقة Q (used) = Q (Supplied) لا تتحقق إلا إذا كانت معاوقة النظام تساوى Z_o ، وتسمى الـ C/C Impedance ، والتى تتراوح قيمتها بين 400 – 600 أوم فى خطوط النقل بينما تصل إلى 40–60 أوم فى الكابلات.

والأهمية النظرية لهذا المصطلح أنه إذا تم توصيل حمل Pure resistance فى نهاية الخط وكانت قيمته تساوى نفس قيمة الـ C/C Impedance للخط فعندها سيكون الجهد عند الحمل مساويا تماما للجهد عند المصدر دون أى هبوط فى الجهد. وأيضا فى هذه الحالة سيكون قيمة التيار المسحوب من الحمل تساوى

$$|I_L| = \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

وإذا ضربنا طرفى المعادلة السابقة فى $\sqrt{3}V$ سنحصل على قيمة الـ SIL كما يلى

$$SIL = \sqrt{3}|V| \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

|V| in kVs

$$SIL = \frac{|V|^2}{\sqrt{(L/C)}} \qquad \text{MW}$$

11.3.1 أهمية قيمة الـ SIL

الرقم الممثل للـ SIL له أهمية كبرى لمهندسي التشغيل ، فالرقم أولا نحصل عليه بسهولة فأنت لا تحتاج سوى معرفة جهد الخط وقيمتى الـ L and C حتى تحسب قيمة الـ SIL. فما أهمية هذا الرقم؟

أهمية هذا الرقم تظهر من المنحنى شكل 11–10 . حيث يتبين من هذا المنحنى أنه إذا تم تحميل الخط بحمل أقل من SIL فهذا يعنى أن الخط يعمل كأنه Shunt Capacitor أى يعطى Q بينما إذا تم تحميل الخط بحمل أكبر من الـ SIL فمعناه أن الخط يعمل كأنه Shunt Reactor أى أنه يسحب قدرة غير فعالة.

ففى الشكل 11–10 يفترض أن لدينا خط له SIL = 450MW فإذا تم تحميل الخط بحمل قدرة 450 MW بالضبط فهذا بمعنى آخر أن القدرة غير الفعالة المولدة بواسطة مكثفات الخط تساوى تماما القدرة غير الفعالة التى يحتاجها الخط ، فإذا زاد التحميل عن هذه القيمة فإن الخط سيحتاج لسحب Q من أى مصدر (سواء المولد نفسه أو من مكثفات مساعدة كما سنرى) .

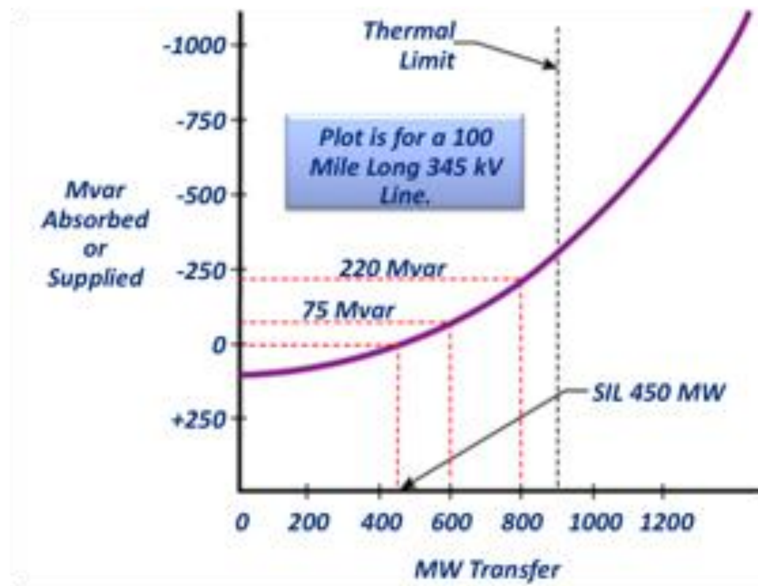


Figure 11-10 Power Limits according to SIL

ومن هنا تظهر أهمية هذا الرقم بالنسبة لمشغل الشبكة ، أنه يستطيع بسرعة وبحسابات بسيطة تقدير القدرة غير الفعالة المطلوبة ، فعلى سبيل المثال لو فرضنا أن الـ C/C Impedance لخط ما تساوى 400Ω وكان جهده يساوى 110 kV فهذا يعنى أن الـ SIL = 30MW ، وبالتالى فإن الـ Operator يكون عنده تقدير لطبيعة عمل الخط حسب نسبة تحميله وهل أعلى أم أقل من الـ SIL المحسوبة كما رأينا فى المنحنى السابق.

11.3.2 دور القدرة غير الفعالة فى خطوط النقل

المعادلة التالية تمثل قيمة القدرة غير الفعالة الواصلة عند طرف Receiving end

$$Q_r = \frac{V_s V_r}{X_1} cos\theta - \frac{V_r^2}{X_1}$$

حيث θ هى نفسها δ فى المعادلة المشهورة وتمثل الزاوية بين الجهدين فى طرفى خط النقل.

و X1 هى reactance of the transmission line

ومن المعادلة السابقة يمكن أن نصل إلى علاقة الـ Reactive Power بالجهد كما يلى:

$$V_r^2 - V_s V_r + X_l Q_r = 0$$

وهى معادلة من الدرجة الثانية تعطى حلين أحدهما مرفوض ، والثانى يظهر فى المعادلة التالية:

$$V_r = \frac{V_s - \sqrt{V_s^2 - 4.X_1.Q_r}}{2}$$

فإذا اعتبرنا أن

Q_r = Q1 (Demand) - Q_2 (supplied).

فسيكون لدينا 3 احتمالات:

- الأول: أن تكون Q_2 (supplied) = Q_1 (Demand) ، فى هذه الحالة سيكون $V_s = V_r$ وهو المطلوب.
- الثاني: أن تكون Q_1 (Demand) < Q_2 (supplied) ، فى هذه الحالة سيكون $V_s > V_r$ وهو الأكثر شيوعا ، وسنحتاج لطرق معينة لرفع هذا الجهد.
- الثالث : أن تكون Q_1 (Demand) > Q_2 (supplied) ، فى هذه الحالة سيكون $V_s < V_r$ وهذا يحدث عند التحميل الخفيف وهى غير مرغوب فيه لخطورته ، وسيعالج باستخدام الـ Shunt Reactors كما سنرى لاحقا.

ومن هنا يمكن أن نفهم أيضا الشكل اللطيف 11−11 والذى يعبر عن دور Q فى عملية اتزان الجهد.

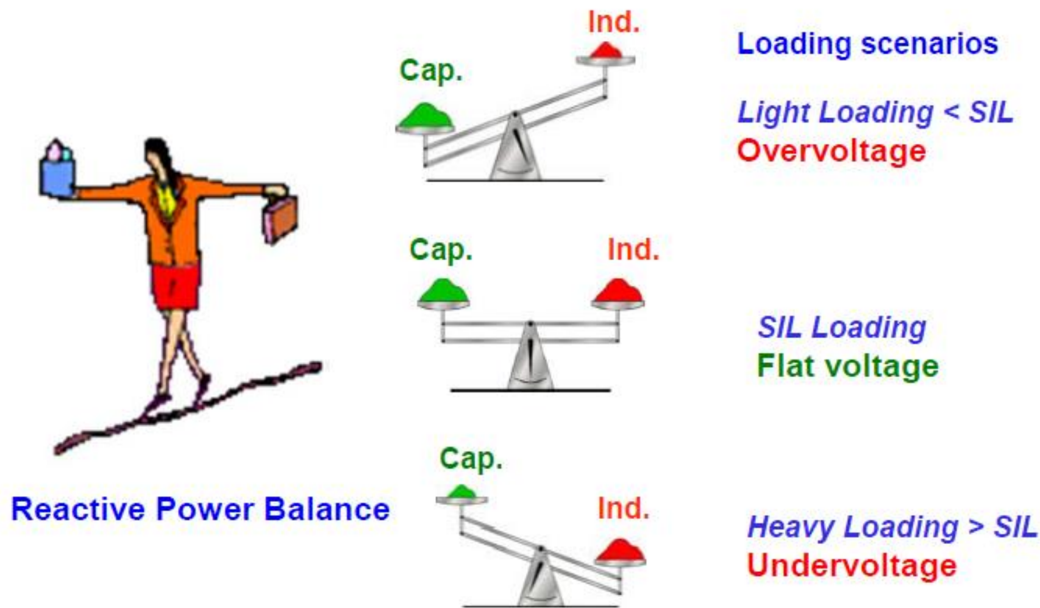


Figure 11-11 تأثير القدرة غير الفعالة على اتزان الجهد

معلومة

من أجل تحسين معامل القدرة والتحكم في قيمة القدرة غير الفعالة بلغ إجمالى السعات المركبة حتي صيف 2014 على الجهود المتوسطة والمنخفضة فى مصر حوالي 9635 ميجا فار ، بالإضافة إلى 800 ميجا فار على شبكة الجهد الفائق 220 ك فولت ، ونتيجة لذلك فقد بلغ معامل القدرة بالشبكة الموحدة حوالي 92% ومن المستهدف الوصول إلى 94% .

11.4 معوضات القدرة غير فعالة

بدلا من جعل الـ Q تسير على الخط الناقل بين المصدر والحمل فإننا نركب أجهزة بتقنيات متنوعة لنحصل منها على الـ Q المطلوبة عند الحمل مباشرة بدلا من الحصول عليها من مصدر القدرة ، وهذا يعنى أن الخط الواصل بين المصدر والحمل سيصبح مخصصا للقدرة الفعالة فقط وبالتالي تتحسن مشكلة الهبوط فى الجهد . إضافة إلى أن المصدر لم يعد مطالبا بإمداد الحمل بالـ Q وهذا سيجعل S = P ومن ثم يمكن تغذية أحمال أخرى.

وقد ظهرت هذه التقنيات مع ظهور مايسمى بـ Flexible AC Transmission System, FACTs ، أو منظومة النقل المتردد المرنة ، وهى ببساطة مجموعة تقنيات (أجهزة) متنوعة تعتمد على استخدام معدات إلكترونية عالية القدرة high Power مثل الـ SCR وذلك مع أساليب التحكم المتطورة من أجل التحكم أساسا

فى القدرة غير الفعالة بالإضافة للتحكم أيضا فى القدرة الفعالة وقيمة الـ X وقيمة الـ Phase Angle بين المحطات .

11.4.1 الفرق بين مرور الـ P ومرور الـ Q فى الخطوط

فى الشكل 11-12 نموذج مبسط لخط نقل

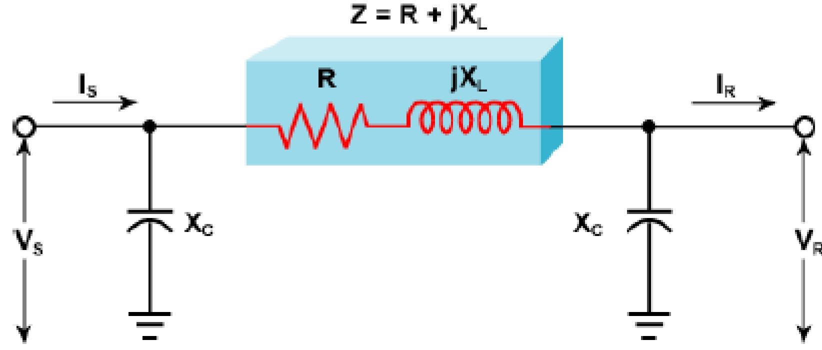


Figure 11-12

فإذا فرضنا أن مقاومة الخط مهملة ، فإن القدرة الفعالة وغير الفعالة المولدة من المصدر ، والمستقبلة بواسطة الأحمال تمثل بالمعادلات التالية:

$$P_S = \frac{V_S \times V_R}{X_L}\sin\delta \qquad Q_S = \frac{V_S^2 - V_S V_R\cos\delta}{X_L} - \frac{V_S^2}{X_C}$$

$$P_R = \frac{V_S \times V_R}{X_L}\sin\delta \qquad Q_R = \frac{-V_R^2 + V_S V_R\cos\delta}{X_L} + \frac{V_R^2}{X_C}$$

ومن هذه المعادلات يتبين:

1- أن القدرة الفعالة الصادرة من المصدر والقدرة الواصلة للحمل متساويتان (بإهمال مقاومة الخط)
2- أن هناك فرق بين القدرة غير الفعالة الصادرة والواصلة حيث $Q_R << Q_S$
3- لايمكن نقل الـ Q لمسافات طويلة على الخطوط حيث تتميز هذه الخطوط بارتفاع نسبة X/R وهذا يعنى أن الخطوط نفسها صارت "Big Sink " أى تبتلع كمية كبيرة من الـ Q حيث I^2 X المستهلكة فى الخط كبيرة جدا وبالتالى صارت كفاءة النقل ضعيفة جدا.

4- يترتب على الملاحظة السابقة أن الحل الوحيد لتعويض القدرة غير الفعالة هو استخدام تقنيات لمعوضات محلية عند نقاط الأحمال.

11.4.2 الهدف من استخدام هذه التقنيات :

1- زيادة القدرة المنقولة من القدرة الكهربية إلى الحدود القصوى للتحمل الحرارى لتلك الخطوط بجعلها مخصصة فقط لنقل القدرة الفعالة ، وبدون أن تحملها بالقدرة غير الفعالة . وهذا يعنى أنه توفير إضافة خطوط جديدة قد تحتاج لأراضى وأبراج وموصلات وخلافه.

2- تحسين الجهود عند نقاط الشبكة المختلفة .

3- التحكم فى مسارات القدرة دون الاضطرار لإنشاء محولات Phase Shifting مثلا .

هذه الأجهزة تركب على خطوط نقل القدرة ذات التيار المتردد فتساهم بمرونة وسلاسة فى التحكم فى القدرة المنقولة عبر خطوط التيار المتردد ، على سبيل المثال يمكنها أن تتحكم فى القدرة غير الفعالة المنقولة عبر هذه الخطوط ومن ثم تزيد من استقرار جهد المنظومة الكهربية.

و حيث أن المنظومة الكهربية التقليدية من مولدات ومحولات وخطوط وغيره لا يمكن تغيير الـ Parameters الرئيسية بها مثل الجهد والمعاوقة والـ Phase Angle إلا من خلال فتح قواطع أو غلقها أو تركيب خطوط/مولدات/محولات جديدة وكل هذه أمور مكلفة جدا وتحتاج لوقت وأراضى واستثمارات ، أما مع استخدام هذه الأجهزة الحديثة فيمكن تحقيق نفس الأهداف ولكن إلكترونيا باستخدام تقنيات ومعدات الـ Facts ومن هنا سميت بهذا الاسم ويعنى Flexible Ac Transmission Systems أو الخطوط المرنة لنقل التيار المتردد.

11.4.3 التحكم فى عناصر الشبكة

ولتنفيذ الأهداف السابقة على أرض الواقع ، هناك العديد من الأجهزة التى يمكن استخدامها منها:

-1 <u>أجهزة تقليدية مثل :</u>

1. Generator Synchronous
2. Synchronous Motors
3. Shunt Reactors
4. Series Capacitors
5. Shunt Capacitors

-2 <u>- أجهزة حديثة تندرج ضمن مجموعة الـــ FACTs مثل:</u>

6. Static VAR Compensator, SVC
7. Static Synchronous Compensator, STATCOM
8. Static Synchronous Series Compensator, SSSC
9. Unified Power Flow Controller, UPFC

وهذه الأجهزة – سواء القديمة أو الحديثة – تساعد فى التحكم فى قيم ثلاثة عناصر رئيسية هى:

1- الجهد
2- الـ Phase angle
3- المعاوقة

وسنرى فى هذا الفصل أن الأجهزة التسعة السابقة يمكنها التغيير والتحكم فى القيم الثلاثة السابقة كما أنها تتشابه جميعا فى امتلاك القدرة على التحكم فى قيم القدرة غير الفعالة ، ولذلك يطلق عليها مصطلح عام هو : "معوضات القدرة غير الفعالة" أو Reactive Power Compensators .

والفرق بين الأجهزة التقليدية (من 1 إلى 5) والأجهزة الحديثة (من 6 إلى 9) هو أن التقنية الحديثة تحقق كل الأهداف بتكلفة ومفاقيد أقل كثيرا من الأساليب التقليدية.

فكيف يتم التحكم فى القدرة غير الفعالة؟ هذا ما سنعرضه بأسلوب مبسط للأدوات التسعة السابقة .

11.5 الأجهزة التقليدية للتحكم فى تدفق القدرة غير الفعالة

11.5.1 المولدات الكهربية :

وقد يكون تيار الـ Field فى المولد أقل من الطبيعى ومن ثم تسحب المولدات قدرة غير فعالة من الشبكة الكهربية وقد تكون إثارة المولدات أى تيار الـ Field أعلى من الطبيعى ومن ثم تدفع المولدات قدرة غير فعالة تغذى بها الشبكة ، ولكن القدرة غير الفعالة التى يعطيها المولد أو يمتصها محدودة دائما بقدرة المولد وفقا لرسم الدائره circle diagram الخاص بالمولد ولهذا فاستخدام هذا الأسلوب يعتبر محدود الاستخدام

11.5.2 المعوضات المتزامنة Over-Excited Synchronous Motor:

وهى فى الحقيقة عبارة عن محركات متزامنة Synchrounous Motors ولكن غير محملة Unloaded . ولهذا النوع ميزات عديدة منها أن القدرة غير الفعالة التى تولدها لا تتأثر بجهد المنظومة لأن لها مصدر جهد خاص بها ، كما يمكنها توليد من 10-20 % أكبر من قدرتها الاسمية لمدة نصف ساعة ، ولكن يعيبها محدودية القدرة والتكلفة العالية وكثرة أعطالها وبطء استجابتها للتغيرات مقارنة بالأنواع الحديثة.

وهو محرك من النوع الـ Synchronous يشبه فى تركيبه المولدات المتزامنة تماما لكن يختلف فى شيئين :

- الفرق الأول : أنه غير محمل بأى أحمال ومن ثم لا يستهلك أى P مطلقا

- والفرق الثانى هو طريقة التحكم فى المجال المغنطيسي له الذى يمكن عن طريق التحكم فيه أن نتحكم فى كمية الـ VAR التى ينتجها ومن ثم فهو لا ينتج سوى قدرة غير فعالة وبقيمة متغيرة وأسلوب التغيير سلس وناعم على عكس الـ Shunt Cap/Ind الذى يحتاج إلى CBs أو Contactors للتحكم فى عدد المكثفات/الملفات التى تدخل أو تخرج من الخدمة.

لاحظ أن عدم إنتاجها لأى P يعنى أنها تنتج Q بمدى أو كميات أكبر بكثير من المولد التقليدى ، علاوة على أنها تصنع بتصميم خاص فتصبح أقل تكلفة من المولدات الكهربية التقليدية التى تنتج P and Q .

11.5.3 استخدام Shunt Reactors :

تستخدم هذه الـ Reactors مع شبكات الجهد العالي ويمكنها امتصاص القدرة غير الفعالة الزائدة والتى غالبا تكون من النوع الـ Reactive Capacitive وناتجة عن وجود أطوال كبيرة من الكابلات أو خطوط طويلة مع انخفاض فى الأحمال ومن ثم تتسبب فى ارتفاع الجهد مالم يكن هناك وسيلة مثل الـ Shunt Reactors وتوصيلها على الشبكة فى هذه الأوقات لامتصاص هذه القدرة غير الفعالة لكن يعيب هذه الطريقة الحاجة لتركيب CBs مكلفة خاصة فى الجهود العالية كما أن هناك مشكلة أنه قد يحدث ارتفاع مفاجئ فى القدرة غير الفعالة نتيجة فصل مفاجئ لأحد الأحمال قبل توصيل الـ Shunt Reactors (شكل 11–13) فى الخدمة. والبديل ليس مقبولا وهو توصيلها بشكل دائم حيث سنحتاج لعمليات فصل وتوصيل متعددة حسب تغير الاحمال.



Figure 11-13 Shunt Reactors

11.5.4 استخدام الـ Series Capacitors :

تركب هذه المكثفات على التوالي مع الشبكة (شكل 11–14) ومن ثم تتناقص الـ X المكافئة وتتزايد القدرة المنقولة عبر نفس الخط أو تزيد إمكانية النقل لمسافة أطول لنفس القدرة. وكون أن هذه المكثفات موصلة على التوالي يعنى أن القدرة غير الفعالة المولدة ستتناسب طرديا وأتوماتيكيا مع زيادة التحميل وهذا يعنى تنظيم أفضل للجهد.

لكن يعيب هذه الطريقة حدوث ارتفاع فى الجهد مع التحميل الخفيف مما يتطلب تركيب Shunt Reactors بصفة مستمرة وهذا بالطبع سيقلل من القدرة المنقولة وبالتالى يقلل من أهمية هذا الأسلوب . كما أن هناك إحتمالات كبيرة لحدوث Resonance ومرور تيارات عالية مدمرة.

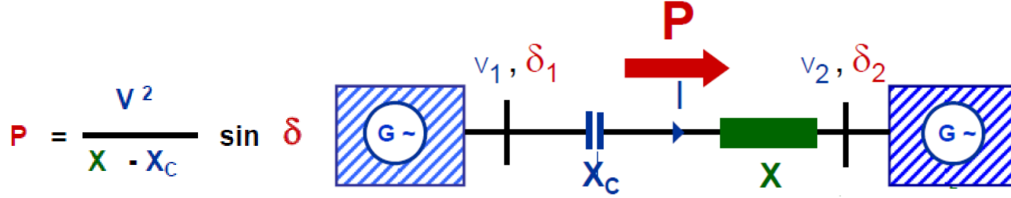


Figure 11-14 Series Compensation

11.5.5 استخدام الـ Shunt Capacitors :

فى هذا الأسلوب تستخدم المكثفات (شكل 11−15) ، وتكون عادة موصلة بصورة دائمة ومركبة بالقرب من الأحمال الكبيرة التى لها معامل قدرة منخفض كما فى الشكل 11−17 . ولكن مشكلة هذا الأسلوب هى الحاجة لقواطع تتحمل الارتفاع فى الجهد نتيجة عملية الـ Switching كما فى الشكل 11−16.



Figure 11-15 Capacitors

كما أن القدرة غير الفعالة حساسة جدا للتغير فى الجهد (تتناسب مع مربع الجهد) ، فعند انخفاض الجهد سيحدث انخفاض فى القدرة غير الفعالة المولدة من هذه المكثفات وهذا عكس مانريد ، فنحن نريد Q عالية عند انخفاض الجهد لتحسينه ، ومن ثم فهذا عيب خطير فى هذا الأسلوب كما أن مشكلة الخوف من حدوث الرنين مازالت قائمة كما فى الأسلوب السابق.

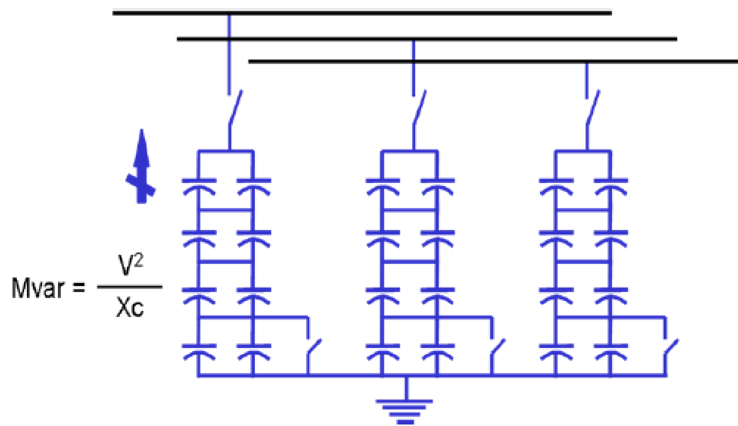


Figure 11-16

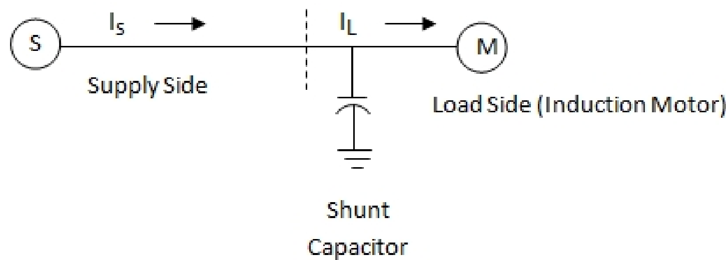


Figure 11-17

11.6 ثانيا : أجهزة الـ FACTS للتحكم فى تدفق القدرة

هذه المنظومة تستخدم مع شبكات النقل وتتميز عن الأساليب السابقة فى أنها تشتمل على مكثفات و ملفات فى وقت واحد ومن ثم فهى قادرة على إنتاج Capacitive/ Inductive Reactive Power ، وتتميز أيضا بسرعة رد الفعل والاستجابة السريعة لأى تغير فى الجهد سواء بالزيادة أو النقصان لأن التحكم فى كمية الـ Q يتم عن طريق SCR – Control Circuits وهى أسرع من الـ Switched Capacitors المستخدمة فى الأنواع التقليدية .

والأجهزة التالية هى عناصر تستخدم ضمن منظومة الـ FACTs أى منظومة المرنة لنقل التيار المتردد. و هذه الأجهزة هى:

11.6.1 أجهزة المعوضات الثابتة Static VAR Compensators, SVC

وهو أبسط أنواع الـ Facts حيث يتكون من مكثفات مركبة على التوازى Shunt Capacitors ، أو تتكون من Inductors موصلة أيضا على التوازى لكنها الفرق هنا عن الحالات التقليدية أنهما يركبان معا فى نفس الوقت و يمكن إجراء عمليات فصل وتوصيل لأى منهما وبأى نسبة بواسطة ثايرستورات محكومة بدوائر تحكم.
ومصطلح الـ SVC يتضمن تحته ثلاثة أنواع:

1- Thyristor-Controlled Reactors (TCR).
2- Thyristor-Switched Capacitors (TSC).
3- Thyristor-Switched Reactors (TSR).

يظهر النوعان الأول والثانى منهم فى الشكل 11-18 .

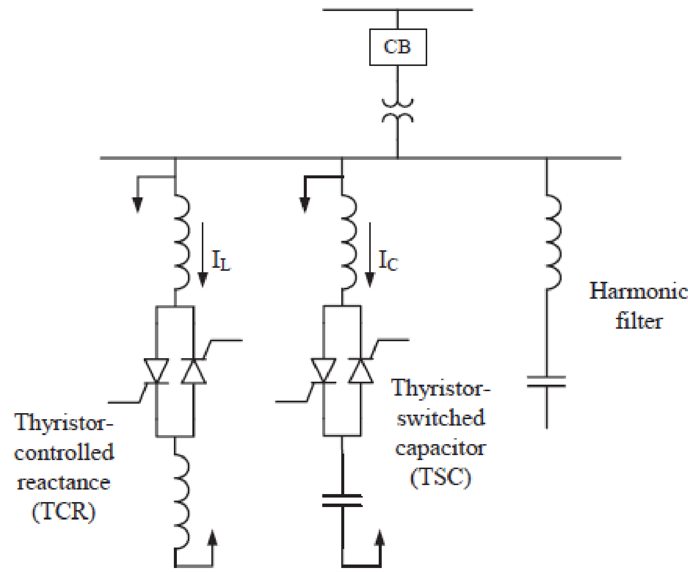


Figure 11-18 SVC

ويتم التحكم فى قيمة الـ Reactance عن طريق التحكم فى درجة توصيل الـ SCR .

لاحظ ضرورة وجود محول بين SVC وبين الشبكة لأننا لا نستطيع تركيبه مباشرة على الجهد العالي بسبب محدودية الجهود التى تعمل بها أجهزة الـ SCR حتى الآن.

والشكل 11-19 هى لمجموعة مكثفات فى إحدى محطات الجهد العالى فى السعودية.



Figure 11-19 HV Capacitors

ويمكن أن نرى أننا حققنا عدة مكاسب من استخدام الـ SVC:

1- القيمة متغيرة أتوماتيكيا وبسهولة حسب تغير وضع الأحمال
2- لا حاجة لوجود CB مكلفة
3- يمكن توليد قدرة غير فعالة من خلال Thyristor Switched Capacitor, TSC ويمكن أيضا من نفس الجهاز امتصاص القدرة غير الفعالة بواسطة Thyristor Controlled Reactor, TCR
4- بمعنى أنها أصبحت كما لو كانت X متغيرة (لاحظ الاسم Flexible)

لكن يعيب هذا النوع :

- التكلفة العالية
- محدودية القدرة حسب احجام المكثفات والـ Inductors المتاحة بالموقع
- تأثر القدرة غير فعالة الـ Capacitive بانخفاض الجهد وبالتالى يقل المنتج منها.



Figure 11-20 : SVC ±250 MVAR in Brazil

11.6.2 أجهزة الـــ STATCOM :

وتعنى Static Synchronous Compensator وهى تطوير للـ SVC السابق شرحه ، وهو عبارة عن Inverters لا تستخدام الثايرستور العادى بل تستخدم نوع أحدث وهو GTO , Gate Turn Off والتحكم فى هذا النوع أسرع وأسهل من النوع التقليدى ، لكن الأهم من ذلك هو أننا هنا لا نستخدم مكثفات ولا Reactors وفى نفس الوقت ننتج ونستهلك قدرات غير فعالة. فكيف يتم ذلك؟

الفكرة هنا هو استخدام دوائر تحكم فى الـ Inverter بحيث ينتج جهدا وتيار (من البطاريات والتى تستبدل بمجموعة المكثفات) بحيث تكون الـ Phase angle بين الجهد والتيار الناتجين إما 90 درجة Lead أو 90 درجة Lag ، شكل 11-21 ، وهذا يعنى اننا أنتجنا قدرة غير فعالة Capacitive or Inductive بدون أن نستخدم مكثفات ولا ملفات. وهذه هى الميزة الأهم لأجهزة الـ STATCOM حيث يترتب على هذه الميزة ميزات أخرى منها صغر الحجم والحاجة لمساحة أقل حيث لا نحتاج لملفات ولا لمكثفات (سوى ما لا يزيد عن 12% من المكثفات التى كانت تستخدم فى الـ SVC وهى هنا ليست بغرض توليد قدرة غير فعالة ولكن بغرض إكمال دائرة الـ Inverter)

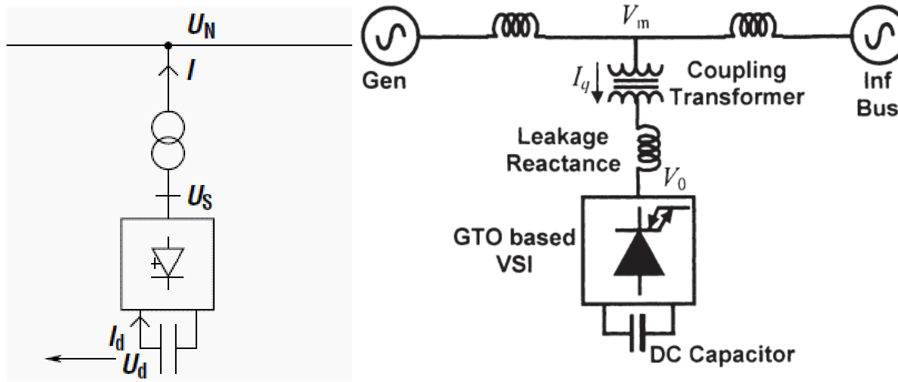


Figure 11-21 STATCOM

ويتميز أيضا بأنه لا يتأثر بجهد الشبكة عند توليد Capacitive Reactive Power ، وهذه الأجهزة موجودة بالخدمة منذ الثمانينيات.

11.6.3 أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators :

وتسمى المعوضات الثابتة الموصلة على التوالي SSSC ، وهو يشبه تماما الـ STATCOM ولكنه يركب على التوالي مع الشبكة وليس على التوازى (شكل 11−22) ومن ثم يعمل على تغيير الـ X المكافئة ومن ثم يمكننا زيادة/أو تقليل القدرة المنقولة عبر الخط دون الحاجة إلى إجراء تغيير فى الخطوط. ويتميز عن الـ Series Capacitors أنه لا يتأثر بقيمة التيار المار فى الدائرة ومن ثم فمجالات استخدامه أوسع.

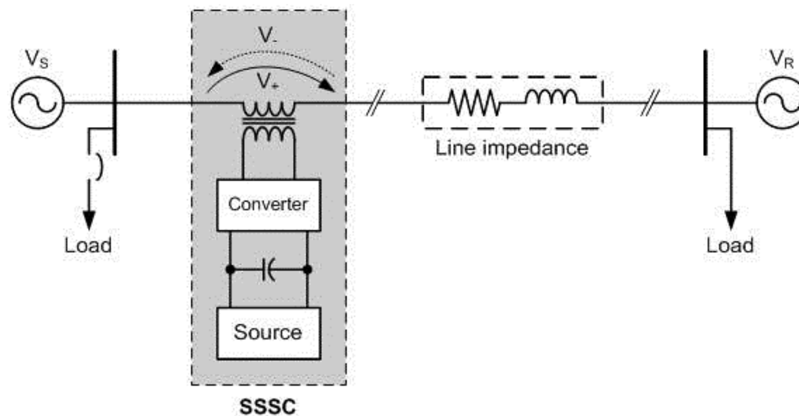


Figure 11-22 SSSC

11.6.4 منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controllers

هذا الجهاز هو عبارة عن الجهازين السابقين معا أى يركب على التوالي والتوازى (شكل 11–23) ، ومن ثم يجمع ميزات كلا النوعين ومن هنا جاءت تسميته بمنظم سريان القدرة الموحد.

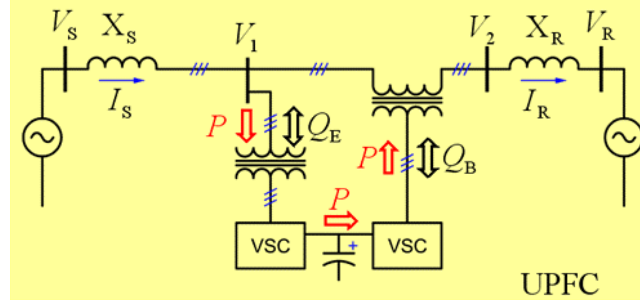


Figure 11-23 UPFC

الباب الثالث

محطات التحويل الكهربائية

(SUBSTATIONS)



12
مقدمة عامة عن محطات التحويل

12.1 مقدمة

معلوم أن الطاقة المولدة فى محطات التوليد يتم نقلها إلى مراكز التوزيع من خلال منظومة لنقل وتوزيع الطاقة . وأحد أهم مكونات هذه المنظومة هى محطات التحويل الكهربية أو الـ Substations .

ويمكن أن تعتبر محطات تحويل الطاقة الكهربية فى شبكتى النقل والتوزيع الكهربي بمثابة المفاصل فى جسم الإنسان ، فرغم وجود الأيدى والأرجل والأصابع وغيرها إلا أن كافة هذه الأعضاء تعتمد فى عملها على وجود المفاصل ، فهكذا محطات التحويل تربط بين محطات توليد الطاقة الكهربية المختلفة ومراكز الأحمال والتى غالبا تقع على مسافات بعيدة عن محطات التوليد ، حيث تتواجد محطات التوليد قرب مصادر الطاقة مثل البترول والغاز ، وكذلك بالقرب من مصادر المياه (لتوليد الطاقة والتبريد) ، وبالتالى فهى ليست بالضرورة قريبة من مراكز الأحمال بل غالبا تقع بعيدة عنها.

ونظرا لبعد محطات التوليد عن الأحمال فكان لابد من إنشاء محطات تحويل لرفع الجهد Step Up S/S من أجل تقليل الفقد فى الطاقة كما هو معلوم ، وهذه النوعية من المحطات (Step Up S/S) تقع داخل محطات التوليد . ثم تخرج خطوط الجهد العالي إلى عدد من محطات الجهد العالي أيضا فى أماكن أخرى بالدولة بغرض ربط محطات التوليد معا بواسطة شبكات الجهد العالي . ثم هناك ربط بين المحطات ذات الجهود العالية المختلفة لتكوين الشبكة الموحدة .

فعلى سبيل المثال فإن محطات التحويل جهد 500/220 kV ، تربط بين شبكتين مختلفتين فى الجهد (شبكة الـ 500 ك ف ، وشبكة الـ 220 ك ف) ، وهذا النوع من محطات التحويل تسمى Transmission Substations ، حيث تتصل هذه المحطات ببعضها البعض عن طريق خطوط نقل – أرضية أو هوائية – لنقل الطاقة سواء فى الدخول عليها أو الخروج منها.

ولتوزيع الطاقة المولدة فى المناطق القريبة من الأحمال فهذا يتطلب إنشاء نوع آخر من محطات التحويل هو الــ Distribution Substations ، والهدف من هذا النوع من محطات التحويل القريبة من الأحمال هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة ، إلى عدد كبير من المغذيات متوسطة الجهد والقدرة ، لتغذى مساحة جغرافية أكبر .

ثم يكون النوع الأصغر من محطات التحويل والتى تصنف أيضا على أنها Distribution Substations وهى المحطات الموجودة فى وسط مناطق الأحمال والتى تحول الجهد المتوسط إلى جهد منخفض ، ويتم التوزيع منها على المستهلكين كما فى الشكل 12–1.

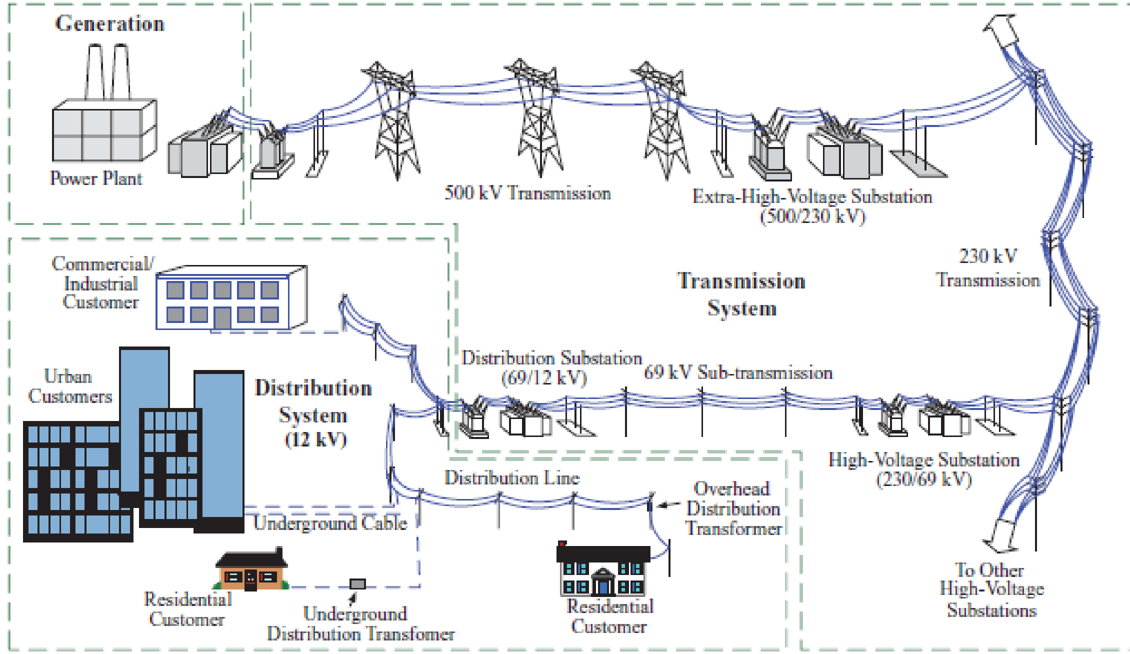


Figure 12-1 أنواع محطات التحول

12.1.1 أهمية محطات الـ Transmission S/S

نحن نحتاج إلى ربط شبكات النقل ذات الجهود المختلفة ببعضها البعض من أجل نقل وتبادل الطاقة بين هذه الشبكات حسب الحاجة ، فعلى سبيل المثال هناك فى مصر محطات توليد تتصل مباشرة بشبكة الـ 500 kV ، وهناك محطات توليد أخرى ترتبط مباشرة بشبكة الـ 220 kV ، وهذا يعنى أن لدينا فى كل شبكة منهما مخزون من الطاقة المولدة ليس بالضرورة أن يكون متساويا. ولذا فهذه الشبكات ترتبط ببعضها البعض وتتبادل الطاقة فيما بينها ، وتسمى المحطات حينئذ بمحطات النقل (Transmission substations) حيث ترتبط المحطات من هذا النوع بعدد من خطوط النقل.

وبعض محطات النقل يمكن أن يوجد بها Phase Shifting Transformers للتحكم فى الـ Power Flow مابين اثنين من نظم القوى. فكما هو معلوم فإن الطاقة المنقولة من محطة لأخرى تحسب من المعادلة :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

وكما هو واضح من المعادلة فإن أحد طرق التحكم فى القدرة المنقولة هو التحكم فى الزاوية بين جهدى المحطتين هى δ_{12} التى تعرف بالـ Power Angle ، وهذا يمكن أن يتم من خلال Phase Shifting Transformers . وبالتالى فهذا دور آخر من أدوار محطات التحويل.

12.1.2 أمثلة عملية

وكمثال لمحطات الربط بين الشبكات ذات الجهد المختلف انظر مثلا إلى محطة محولات "القاهرة 500 " فى الشبكة الموحدة التى عرضت فى بداية الباب الأول (شكل 1–7) ، ففى هذه المحطة يوجد محولات بجهد 500/220 kV ، حيث تستقبل هذه المحطة خطوط نقل جهد 500 ك ف من أربع محطات توليد هى : الكريمات وشمال الجيزة والنوبارية وغرب القاهرة ، وترتبط بخطوط نقل جهد 500 ك ف مع محطات تحويل ليس بها توليد لكن لمجرد الربط مع الشبكات الأخرى مثل محطات باسوس وسمالوط ، كما ترتبط بخطوط أخرى تقع ضمن شبكة الـ 220 ك ف مثل محطات الهرم والمعتمدية و6–أكتوبر (محطة توليد) ، وبالتالى تعتبر محطة للربط بين شبكتى الـ 500 kV والـ 220 kV ، وبالتالى فهى محطة محورية بين شبكتين لهما جهد مختلف وفى كل منهما محطات توليد مختلفة.

وقد يكون من أدوار محطات التحويل مجرد الربط بين محطات من نفس الجهد بغرض تحسين القدرة على عمل مناورات للتغذية أثناء فترات الأعطال أو الصيانة ، كما فى محطة الأميرية مثلا فى شبكة الـ 66 ك ف بمصر (شكل 12–2) والتى ترتبط بمحطات الحلمية وبهتيم والشمال وكلهم لهم جهد 66 ك ف وليس بينهم أى محطات توليد.

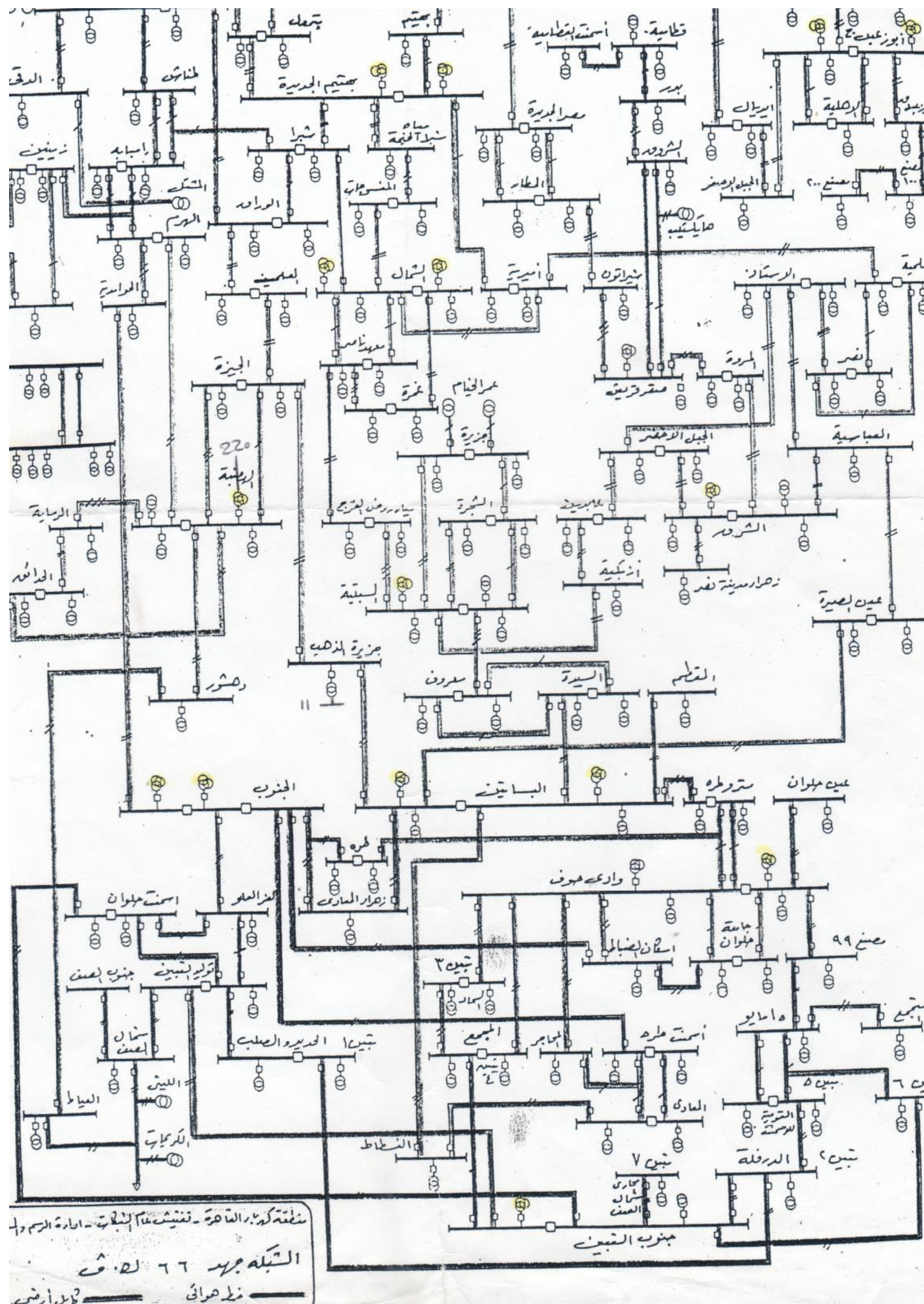


Figure 12-2

جزء صغير من شبكة الـ 66 ك ف فى مصر

أو كما فى الشكل 12–3 ، الذى يمثل جزءا من شبكة الـ 132 ك ف فى الكويت ، فمحطة الـ ARDY C مثلا تربط بين محطات الـ ARDY E ومحطة الـ ARDY AW و محطة الـ SBNR C ، وجميعهم لهم نفس الجهد 132 kV ، وليس فيهم أى محطة توليد ، ولكن الفائدة هنا أننا يمكن تغذية المحطة من عدة جهات حسب ظروف التشغيل.

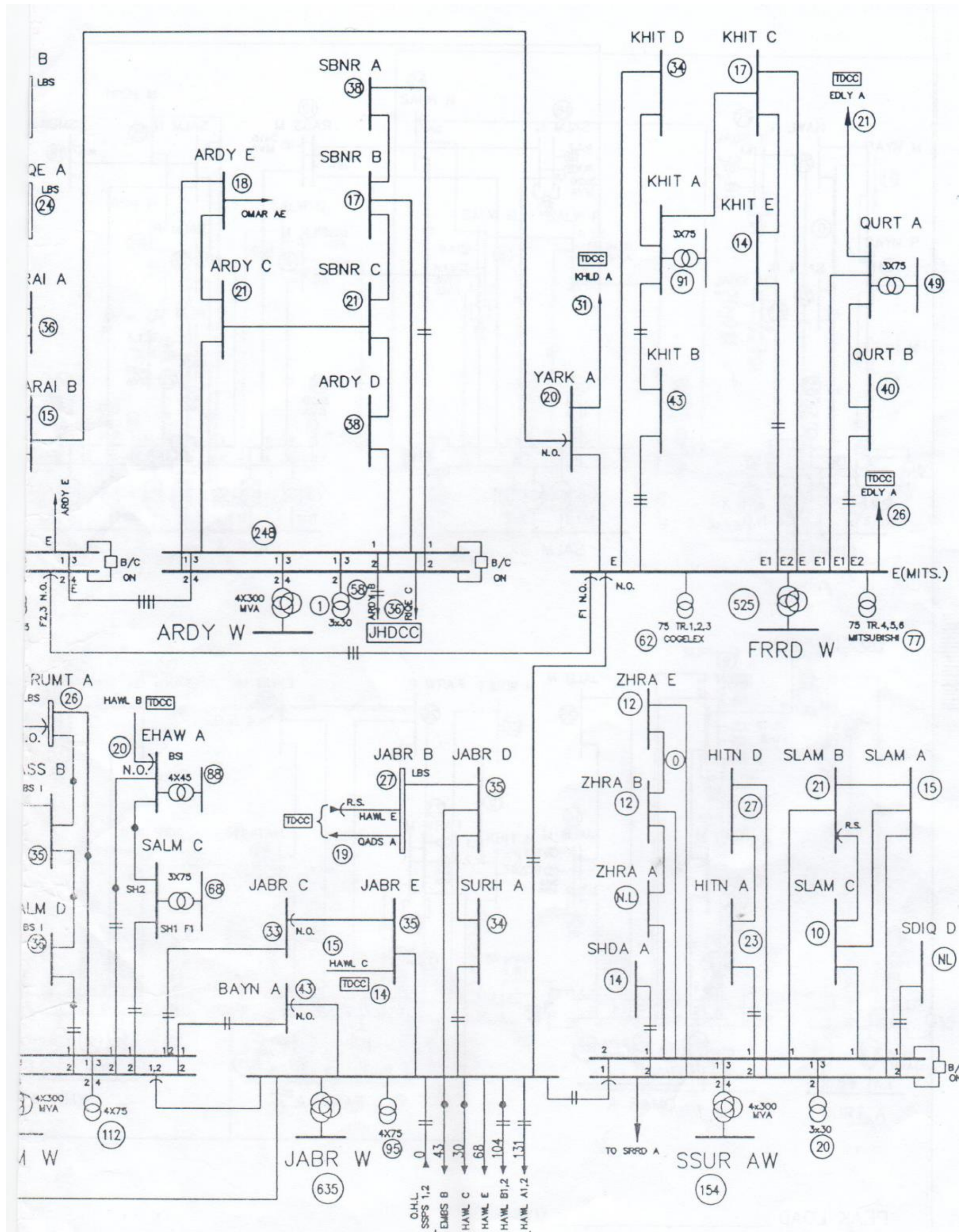


Figure 12-3

جزء من شبكة الـ 132 ك ف فى الكويت

وقد يكون دور محطة التحويل هو الربط مع محطات من نفس الجهد كما فى الأمثلة السابقة لكن فى نفس الوقت ترتبط مع شبكة التوزيع على سبيل المثال محطة محولات الوسطى بصعيد مصر (شكل 12–4) ، فهى ترتبط مع محطات الواسطى ومحطة مركز ناصر والكريمات وكلهم على شبكة الـ 66kV من خلال خطوط ربط ، بالإضافة إلى ارتباطها بشبكة الـ 11kV من خلال ثلاثة محولات جهد 66/11kV ، وهذه المحولات الأخيرة يخرج منها ما يقرب من 30 كابل (من K1 إلى K31) إلى الموزعات Distributors المنتشرة بالمدينة كما يظهر فى المخطط العام للمحطة.

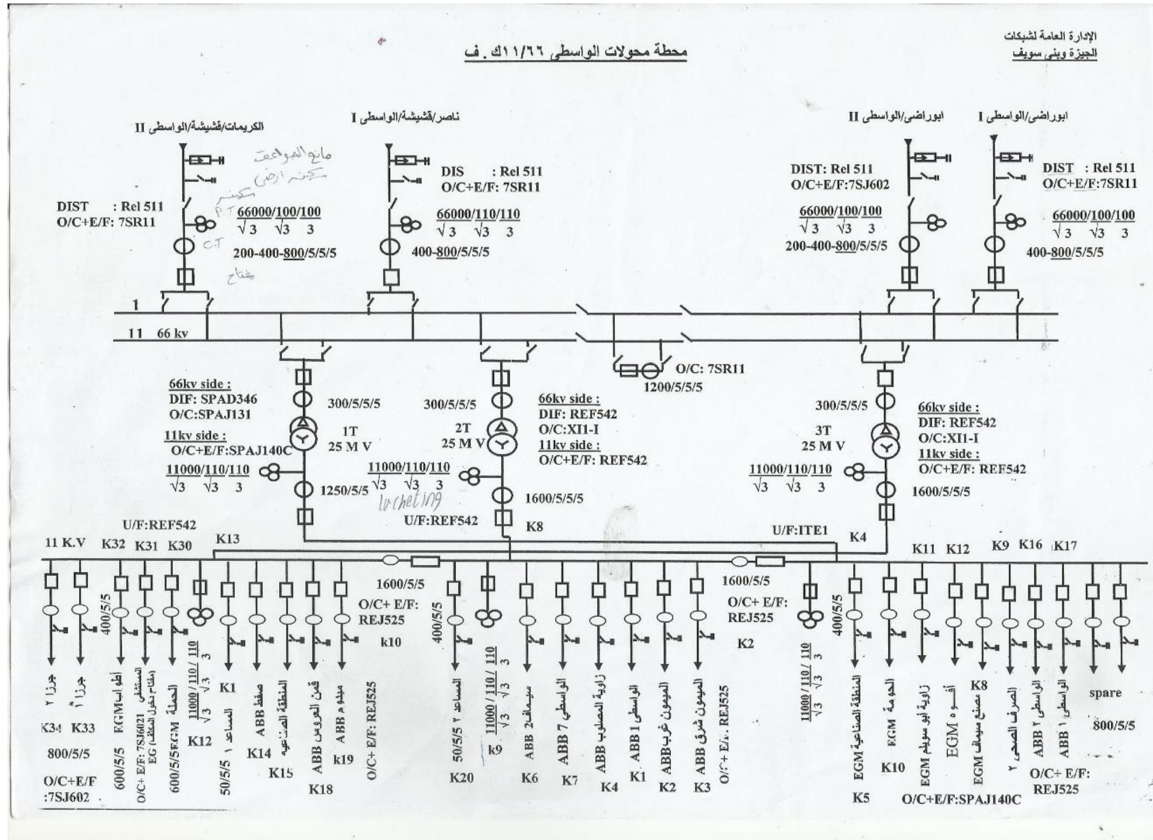


Figure 12-4 محطة تحويل من شبكة النقل للتوزيع

12.1.3 وظائف أخرى لمحطات التحويل

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى تحديد أهداف ووظائف محطات التحويل فى الشبكة الكهربية ، ونلخصها هنا فيما يلى :

1- ربط وحدات التوليد مع الشبكة الموحدة .

2- رفع مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل (بهدف تقليل المفقودات Losses بالشبكة) وبالتالى ربط شبكات النقل ببعضها.

3- ربط شبكة النقل بشبكة التوزيع ، حيث يتم خفض مستوى الجهد من مستوى جهد النقل إلى مستوى جهد التوزيع الذى يناسب خدمة المستهلكين الكبار (المصانع مثلا) ، وكذلك خفض مستوى الجهد ضمن الحدود والمتطلبات المناسبة للمستهلك العادى . وهناك كثير من محطات التحويل تحقق الوظيفتين الثانية والثالثة معا.

4- التحكم فى فصل وتشغيل دوائر الخطوط ودوائر المحولات عند الحاجة لإجراء الصيانة والفحوصات المبرمجة أو عند الحاجة للتوسعة والتركيبات الإضافية عن طريق المفاتيح الكهربية المتواجدة في محطات التحويل والتى يمكن التحكم فيها من داخل المحطات أو من مراكز التحكم المركزية .

وكل هذه الأهداف أو الوظائف يمكن استنتاجها من المقدمة السابقة ، لكن هناك هدفين آخرين سيذكرا لاحقا حين نتحدث بالتفصيل عن مكونات محطات التحويل . فمن خلال دراسة هذه المكونات سيتبين أنه يوجد داخل محطات التحويل المعدات الخاصة بمهمتين كبيرتين إضافيتين ، هما تنظيم الجهد ، ووقاية المعدات الكهربية .

1- فأما تنظيم الجهد فيتم عن طريق استخدام Transformer Tap Changer ، أو أجهزة الـ Voltage Regulators ، أو عن طريق توصيل Capacitors or Inductors ، أو باستخدام أجهزة الـ FACTs للتحكم فى قيم القدرة غير الفعالة من أجل رفع أو خفض قيمة الجهد بالشبكة ، وجميع هذه المعدات موجودة داخل محطات التحويل . وهناك المزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع فى الباب الثاني –الفصل الحادى عشر :Facts ، وأيضا فى الباب السادس الفصل التاسع والعشرون : استقرار الجهد ، من هذا الكتاب.

2- وأما أنظمة الوقاية الموجودة بداخل هذه المحطات فيمكن من خلالها اكتشاف الأعطال سواء كانت هذه الأعطال بالمعدات الموجودة داخل المحطة أو على الخطوط الخارجة منها أو الداخلة إليها ، وبالتالى فمهمة فصل أى جزء من شبكة النقل أو شبكة التوزيع نتيجة الأعطال أو نتيجة إجراءات الصيانة تقع على عاتق مهمات الوقاية الموجودة داخل محطات التحويل. وسنشير باختصار لأسماء منظومات الوقاية المركبة على العناصر المختلفة بالمحطة دون تفاصيل فى نهاية هذا الباب . ويمكن الرجوع لكتابى : نظم الحماية الكهربية فى شرح التفاصيل الخاصة بمنظومة الوقاية.

12.1.4 تصنيف محطات التحويل

محطات التحويل يمكن تصنيفها طبقا لعدة معايير ، وأهم هذه المعايير هى:

<u>التصنيف حسب الوسط العازل بين عناصرها (هوائية أو غازية):</u>

- هوائية أى معزولة بالهواء الجوى Air Insulated Substation, AIS
- غازية أى معزولة بالغاز Gas Insulated Substation, GIS

و تتشابه محطات التحويل الهوائية والغازية فى مكوناتهما إلى حد كبير ، والخلاف بينهما يكمن أساسا فى نوع العازل (هواء/ SF6) المستخدم فى مهمات (معدات) منطقة الجهد العالي ، أما باقى مناطق المحطة فمتشابهة تماما. مع ملاحظة أن هناك تطابق فى أسماء المكونات الموجودة فى منطقة الجهد العالي فى كلا النوعين من المحطات إلا أن شكل هذه المكونات ومواصفاتها يختلف تماما.

التصنيف حسب الجهد (محطات نقل أم توزيع) :

- محطات تحويل رئيسية 66/220/500 ك.ف والمتواجدة ضمن منظومة النقل.
- محطات تحويل فرعية 0.4/22 ك.ف ، أو 0.4/11 ك.ف التابعة لمنظومة التوزيع .

التصنيف حسب مكان وجود المعدات :

- خارجية (outdoor type)
- داخلية (intdoor type)

فى النوع الأول تكون جميع المعدات المحطة في الساحة الخارجية للمحطة ما عدا معدات التحكم والحماية (control & protection Equipment) فإنها تركب في مبنى التحكم للمحطة (Control Building).

التصنيف حسب طريقة تركيب القضبان العمومية:

يتوفر عالميا أنواع كثيرة من محطات التحويل حسب تركيب القضبان العمومية (Busbar) منها:

1. (Single Bus-Bar)
2. (Single Bus-Bar with Sectionalizer)
3. (Double Bus-Bar with Single Circuit Breaker)
4. (Double Bus-Bar with Double Circuit Breaker)
5. (Breaker and half with Two Main Buses)
6. (Main and Transfer Bus-Bar)
7. (Mesh or Ring Scheme)

وسيدرس هذا الموضوع تفصيلا فى الفصل الرابع عشر من هذا الباب.

12.2 الهيكل العام لمحطة التحويل

تتكون محطة التحويل المرتبطة بشبكة النقل (سواء هوائية أو غازية) من مناطق ومنظومات رئيسية هى :

1- منطقة معدات الجهد العالي H. V. Switchgear

2- منطقة المحولات Power Transformer

3- منطقة معدات الجهد المتوسط M. V. Switchgear

4- منظومة الـ DC (غرف البطاريات و الشواحن و لوحات توزيع التيار المستمر DC)

5- منظومة التحكم Control system

6- منظومة الاتصالات.

7- منظومة إطفاء الحريق.

8- منظومة التأريض

وفيما يلى عرض مختصر وسريع لهذه المناطق و المنظومات قبل التوسع فى الشرح فيما بعد.

12.2.1 المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي

إذا كانت المحطة من النوع AIS (الهوائية) فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة التفريعات HV Switchyard ، وهى المنطقة الأكبر مساحة ، وتشتمل أساسا على قضبان توزيع الجهد العالي الـ HV-BB الذى تدخل عليها خطوط الجهد العالي القادمة إلى المحطة ، و خطوط الجهد العالي الخارجة منها ، وبالطبع تتضمن هذه المنطقة العديد من المهمات (Elements) المرتبطة بهذه الخطوط والتى تسمى إجمالا معدات HV Switchgear وتشمل العناصر مثل:

Lighting Arrestor, HVCB, VT, CT, Isolators, Earthing Switches, etc

كما تتضمن هذه المنطقة أيضا الموصلات الخارجة من الـ HV-BB متجهة إلى منطقة المحولات.

أما إذا كانت المحطة من النوع الـ GIS فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة الـــ High Voltage Switchgear وهى المنطقة الأكبر مساحة فى هذا النوع من المحطات ، وتشتمل على نفس العناصر الموجودة فى محطات الـ AIS ، والفرق فقط أن هذه العناصر تكون مدمجة معا فى وحدة واحدة تسمى الـ Bay كما سنرى. (مصطلح Bay يطلق عموما على مجموعة المعدات التى تتشارك معا لتوصيل خط أو محول على نظام الـ BB بالمحطة)

وتفاصيل هذه المنطقة تدرس فى الفصل الأول من هذا الباب (الفصل الثالث عشر).

12.2.2 المنطقة الثانية: منطقة المحولات

وتشتمل أساسا على محولات القوى الرئيسية فيدخل عليها كابلات الجهد العالي القادمة من منطقة التفريعات ، ويخرج منها كابلات الجهد المتوسط إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط . ورغم أن المحولات عنصر أساسي فى محطات التحويل إلا أننا لن نتعرض لها فى هذا الكتاب ، ويمكن الرجوع لكتابى : المرجع فى محولات القوى الكهربية لدراستها بالتفصيل.

12.2.3 المنطقة الثالثة: منطقة خلايا الجهد المتوسط

تستقبل خلايا دخول الجهد المتوسط Incomming Cells كابلات الجهد المتوسط القادمة من منطقة المحولات ، فيتم توصيلها على الـ MV-BB الذى يربط بين جميع خلايا الدخول والخروج الموجودة بالعنبر.

وهذا الـ MV-BB قد يكون من النوع Single/Double BB ، وبالتالى فإن مهمة هذه المنطقة هى توزيع الطاقة على خلايا الخروج Outging cells المتصلة بالـ MV- BB والتى تخرج من المحطة إلى كبار المستهلكين (مصانع / موزعات).

وتفاصيل المنطقة الثالثة تدرس تفصيلا فى الباب الرابع (الفصل التاسع عشر) من هذا الكتاب.

12.2.4 القسم الرابع: منظومة الـــ DC

وتضم غرفة البطاريات و الشواحن.

والمعدات الأساسية التى تحتاج إلى جهد مستمر DC Voltage بالمحطات هى :

1. منظومة الحماية (القواطع والريلهات)
2. منظومة الاتصالات

وتحتوى غرفة البطاريات على أكثر من مجموعة من البطاريات. على سبيل المثال:

a. مجموعة بطاريات دوائر التشغيل و التحكم Control circuits ، و هى التى تمد أجهزة القطع و التوصيل بالتيار المستمر جهد 220 أو 110 فولت اللازم لتشغيل القواطع ، كذلك تمد أجهزة الوقاية بالجهد اللازم.
b. مجموعة بطاريات أجهزة الاتصالات ذات الجهد 110 أو 48 فولت.

12.2.5 القسم الخامس: منظومة التحكم

غرفة التحكم الرئيسية والتى من خلالها يمكن فصل وتشغيل ومتابعة ومراقبة أى دائرة من دوائر الجهد العالي أو دوائر الجهد المتوسط كما سنرى لاحقا فى هذا الباب (فصل 16) . ويمكن أيضا أن تقرأ المزيد فى الفصل الأخير من الباب الرابع (الفصل 22) عند الحديث عن التحكم فى منظومة التوزيع.

12.2.6 القسم السادس : منظومة الاتصالات

و يحتوى هذا القسم على جميع أجهزة الاتصالات التى تصل المحطة بمراكز المراقبة و التحكم Load Dispatch Center ، بالإضافة الى أجهزة الفصل المعروفة بـ Inter Trip ، حيث تربـط أجهــزة الحماية في المحطة بأجهــزة الحماية في المحطات المقابلة لها على نفس الخط والذي يطلق عليها أيضا Tele Protection.

12.2.7 القسم السابع : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق .

و هى تحتوى على جميع المهمات الخاصة بإطفاء الحرائق Fire Fighting, FF مثل تنكات المياه و الضواغط Compressor اللازمة لضخ الماء و ضواغط الهواء الخ.

والأنظمة (الأقسام) الأربعة الأخيرة ستدرس معا فى الفصل الرابع من هذا الباب (الفصل السادس عشر) تحت عنوان الأنظمة المساعدة بالمحطة. وفى الشكل 12-5 يمثل مخطط عام لأقسام محطة التحويل 220/66/11 kV

12.2.8 القسم الثامن : منظومة التأريض

وهذه المنظومة مرتبطة بكافة الأقسام والمنظومات السابقة ، ولذا تدرس تفصيلا فى فصل خاص من هذا الباب وهو الفصل الخامس عشر.

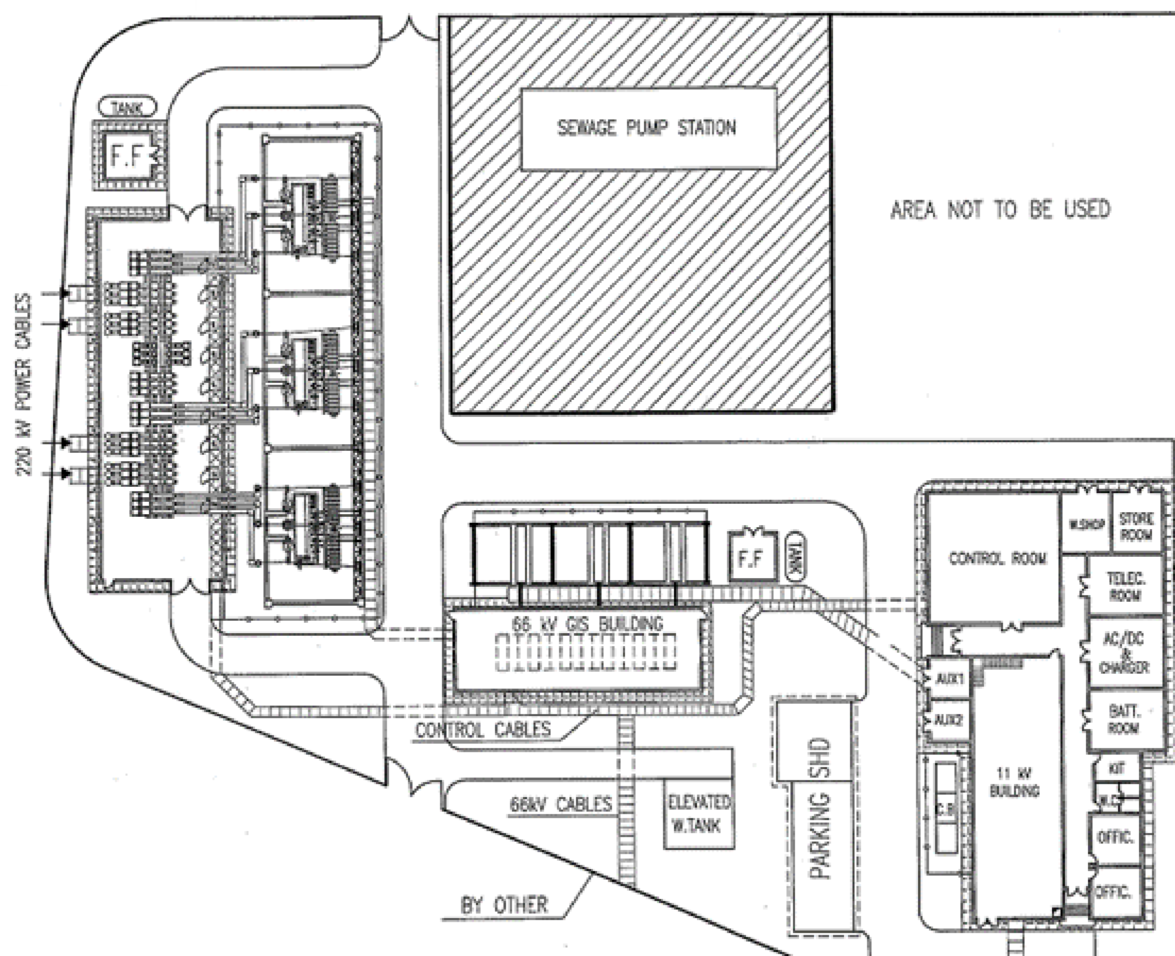


Figure 12-5 Substation Plan

12.3 الأعمال الكهربية لإنشاء محطة تحويل

فى نهاية هذه المقدمة أود أن أذكر بشئ من التفصيل عناوين الدراسات و الأعمال الكهربية اللازمة لإنشاء محطة تحويل. حيث تتضمن عملية تصميم محطة تحويل الأعمال /الحسابات/ الدراسات الكهربية التالية:

- اختيار محولات القدرة لرفع أو خفض الجهد (step up or step down transformers)
- اختيار ترتيب قضبان التوزيع Bus Bar arrangement
- اختيار أجهزة الفصل وسكاكين الأرضي (Isolators and grounding switch)
- اختيار محولات القياس Instrument transformers (CT & VT)
- اختيار محولات الحماية Protection transformers (CT & VT)
- اختيار أجهزة القطع Circuit Breaker
- اختيار كابح الصواعق Lightning arrestors
- اختيار محولات القوي Power transformers
- اختيار نظم الحماية Protective relaying schemes
- اختيار أجهزة تعديل الجهد Voltage regulating equipment
- اختيار منظومة الكابلات
- اختيار منظومة التحكم Control System
- اختيار نظم التأريض Earthing System
- اختيار نظم الإضاءة Illumination System
- اختيار نظم الحماية من الحريق ونظم الإنذار Fire Protection system Fire Alarm and
- اختيار وسائل الاتصالات Communication Systems
- اختيار وسائل التغذية الإضافية Auxiliary supply
- اختيار (الغلق التبادلى) Interlocks
- اختيار منظومة الـــ DC Supplu (البطاريات والشواحن)

ولكى يقوم المصمم بتحديد هذه الاختيارات ، فإن عليه أن يأخذ فى الاعتبار مجموعة من الاعتبارات.

منها اعتبارات تخص المنظومة الكهربية التى ستدخل عليها هذه المحطة ، مثل تحديد:

1- Primary System Characteristics

- ◦ Local Utility
- ◦ Nominal Voltage

- ◦ Maximum Operating Voltage
- ◦ System Frequency
- ◦ System Grounding
- ◦ System Impedance Data

2- Secondary System Characteristics

- ◦ Nominal Voltage
- ◦ Maximum Operating Voltage
- ◦ System Grounding

وهناك اعتبارات تخص توصيف عزل المعدات منها :

3- Insulation Requirements

- ◦ (Basic Insulation Level) , BIL
- ◦ Insulator and Bushing Creep
- ◦ Minimum Clearances
- ◦ Phase Spacing

علما بأن اختيار مستوى العزل سيحدد كثيرا مساحة المحطة ، فبناء عليه سيتم تحديد الخلوصات بين الأوجه المختلفة وبين كل وجه والأرض.

وعادة يتم اختيار قيم العزل لمهمات المحطة طبقا للمواصفات القياسية والتى تأخذ فى الاعتبار الجهود العالية Impulse voltage التى ستتعرض لها المعدات ، والتى عادة تكون إما بسبب فصل وتشغيل الأحمال/المكثفات/المحركات/ القواطع ، أو بسبب عطل على أحد الأوجه فى الشبكات المعزولة ، أو عند توصيل خط من جهة واحدة (جهة المصدر) بينما جهة الحمل مفتوحة ، ففى كل الحالات السابقة سيحدث نوع من الارتفاع فى الجهد على المعدات ، وقد يحدث الارتفاع أيضا بسبب الصواعق الرعدية. (راجع تفاصيل هذه الجزئية فى الفصل الأول من الباب السادس عند الحديث عن الهزات العابرة والـ Surge Voltages فى منظومة القوى.

وهناك دراسات هامة مطلوبة للتصميم مثل :

- Short-Circuit Studies
- Protective Device Coordination
- Arc-Flash Risk Assessment
- Motor Starting

- Transient Stability
- Insulation Coordination
- Harmonic Analysis

وهناك اعتبارات تخص التحكم والمراقبة

- Manned or Unmanned
- Fault Recording
- Local & Remote Control
- Automation
- Communication Protocol

12.4 خريطة الباب

فى الفصول التالية ، نبدأ فى عرض تفاصيل المحطات :

- ففى الفصل الأول من الباب (فصل 13) نقدم شرحا لأهم العناصر (المهمات) الموجودة فى القسم الأول من محطات التحويل (الهوائية والغازية) ، ويختم الفصل بمقارنة بين المحطات الهوائية والمحطات الغازية .كما يعرض بسرعة للقسم الثانى (المحولات بدون تفاصيل) ، والقسم الثالث (عنبر الجهد المتوسط والذى يدرس تفصيلا فى الباب الرابع).
- فى الفصل الثاني من الباب (فصل 14) نقدم شرحا لأنظمة قضبان التوزيع المختلفة بالمحطات ، وميزات وعيوب كل نوع.
- فى الفصل الثالث من الباب (فصل 15) نقدم شرحا تفصيليا لتصميم منظومة الأرضى .
- فى الفصل الرابع والأخير (فصل 16) نقدم شرحا لبقية أقسام المحطة بدءا من القسم الرابع (منظومة الـ DC) ، والقسم الخامس (التحكم والمراقبة) ، و القسم السادس (الاتصالات) ، والقسم السابع (إطفاء الحريق).

13
مهمات منطقة الجهد العالي فى محطات التحويل

فى هذا الفصل سنتتبع جميع المهمات Elements/Equipment الموجودة بالمنطقة الجهد العالى (سواء كانت هوائية أم غازية) ، وذلك من خلال تتبع ظهورها فى الـ Single Line Diagram, SLD الخاص بالمحطة .

وبالطبع قد تختلف أشكال الـ SLD قليلا من محطة لأخرى كما سنرى لاحقا ، بمعنى أنه ليس بالضرورة أن الشكل التالى سيتكرر فى جميع المحطات ، بل ستكون هناك بعض الإضافات والحذف ، لكن تظل الخطوط العامة مشتركة فى جميع أشكال الـ SLDs . وسنبدأ بشرح المخطط أولا قبل شرح المهمات.

13.1 قراءة مخطط المحطة

فى الشكل 13-1 نموذج لمحطة تحويل جهد 11/66 تشتمل على أربع دوائر دخول/خروج فى منطقة الـ 66 ك ف ثم ثلاثة محولات جهد 66/ 11 تغذى منطقة الجهد المتوسط التى تخرج منها أكثر من 30 كابل جهد متوسط إلى الموزعات والمحولات الموجودة فى المنطقة الجغرافية المحيطة بالمحطة.

ونشير هنا إلى أنك لا تستطيع من الـ SLD أن تحدد هل هذه المحطة هوائية أم غازية ، لأنه كما ذكرنا سابقا جميع المكونات متشابهة فى الاسم والوظيفة والدور المنوط بها فى كلا النوعين من المحطات ، وإنما يكون الاختلاف الوحيد فى الشكل وأسلوب العزل ، وهل هو هواء أم غاز ، وهذا لا يظهر من الـ SLD.

ويتم ربط المحطة بالشبكة الموحدة من خلال Incoming/Outgoing Feeders ، علما بأن الخطوط إذا كانت قادمة من محطة توليد فإنها تعتبر خطوط دخول فقط ، أما الخطوط القادمة من محطة محولات فهي قد تكون في فترة ما تنقل قدرة إلى المحطة فتعتبر خطوط دخول Incomming ، و قد تكون في فترة أخرى تنقل قدرة إلى خارج المحطة فتعتبر حينئذ خطوط خروج Outgoing ، و بالطبع لا يمكن أن تكون دخول و خروج في نفس اللحظة .

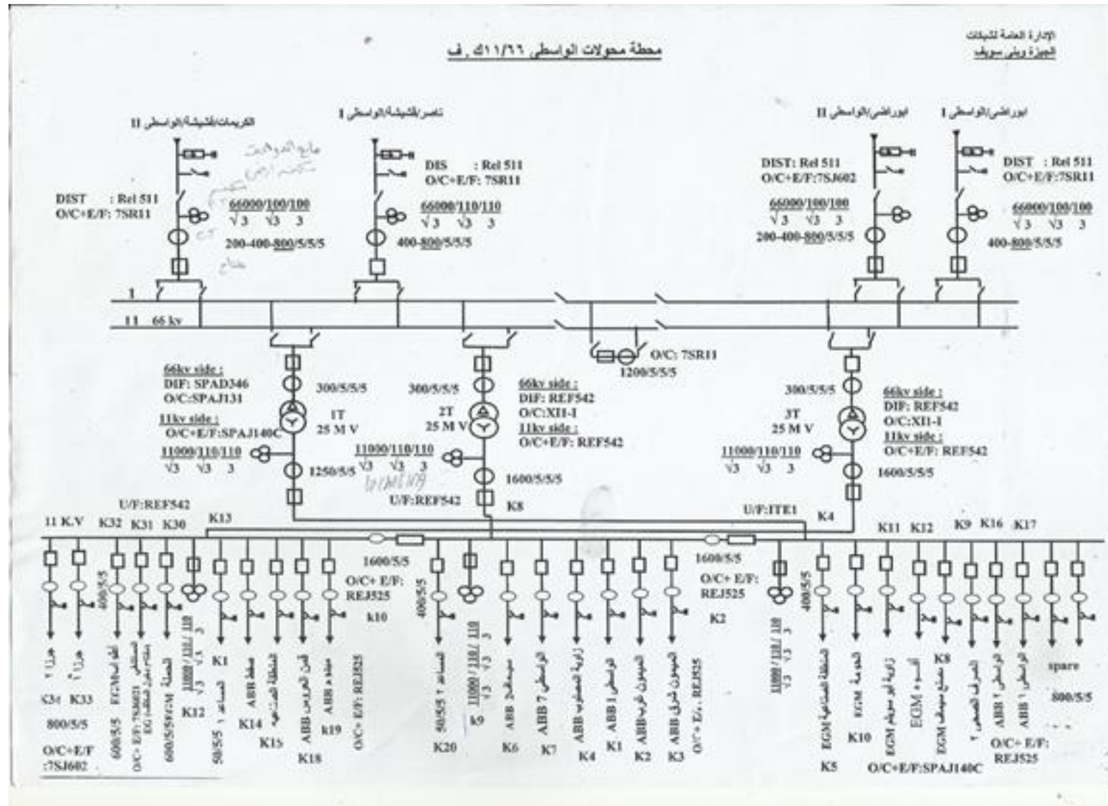


Figure 13-1

على سبيل المثال فى الشكل السابق الذى يمثل محطة محولات الواسطى ببنى سويف لدينا أربع دوائر جهد 66kV، الأولى قادمة من محطة الكريمات وهى محطة توليد ، وبالتالى فهذه الدائرة تعتبر التغذية الرئيسة لهذه المحطة وهى دائما دائرة دخول ، بينما الدائرة الثانية متصلة بمحطة مركز ناصر (وهى محطة محولات) ، والدائرة الثالثة والرابعة متصلين أيضا بمحطة محولات أبو راضى بمدينة الواسطى (وهى محطة محولات) ، وبالتالى فلدينا فقط دائرة وحيدة تعتبر دائرة دخول دائما ، أما الثلاث دوائر الآخر فقد تكون دخول أو خروج حسب ظروف تشغيل الشبكة.

والشكل 13-2 نموذج آخر أكثر وضوحا وتفصيلا للـ SLD.

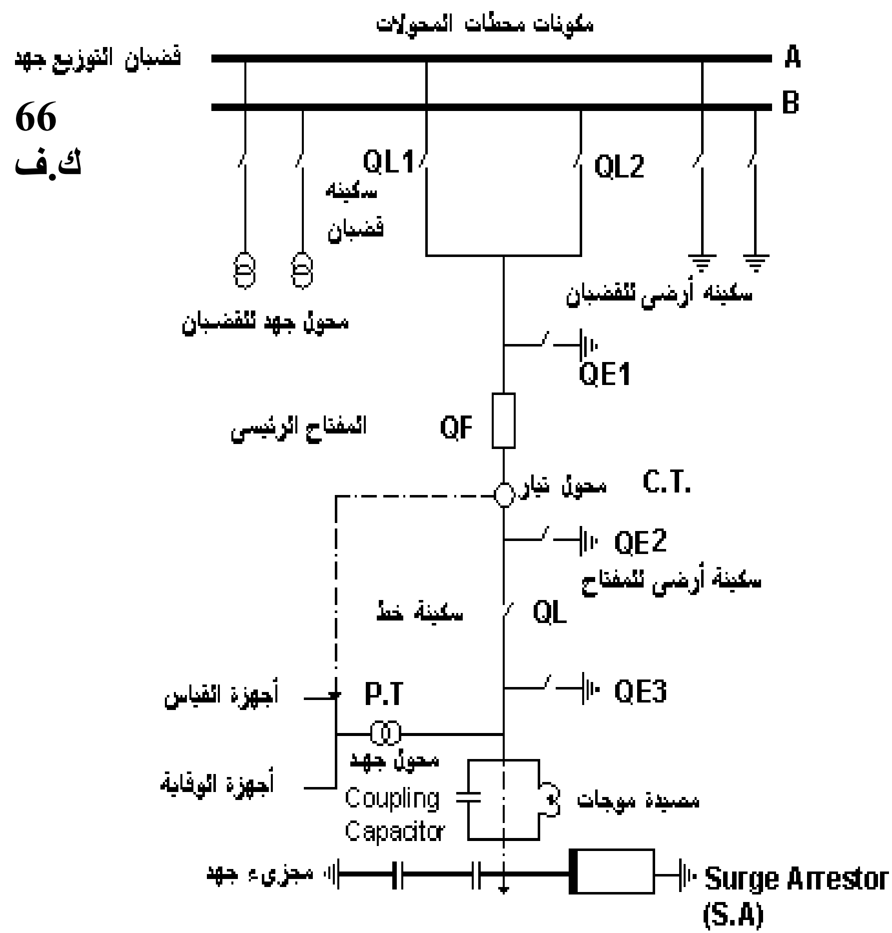


Figure 13-2 عناصر المحطة الخاصة بدخول خط على قضبان توزيع المحطة

وترتيب هذه المهمات على الـ SLD من أعلى لأسفل كالتالى:

1- قضبان التوزيع جهد 66 ك.ف	Busbar, A and B
أ. محول جهد لكل واحد من قضبان توزيع	Potential Transformers
ب. سكينة أرضي لكل واحد من قضبان توزيع	Earth Switches
2- سكينة فصل لكل واحد من القضبان	Busbar Isolators QL1 and QL2
3- سكينة الأرضي رقم واحد للقاطع	Earth Switches QE1
4- القاطع	Circuit Breaker (QF)
5- محول التيار	Current Transformer (C.T)
6- سكينة الأرضي رقم اثنين للقاطع	Earth Switches QE2
7- محول الجهد	Potential Transformer (P.T)
8- سكينة الأرضي للخط	Earth Switches QE3
9- مصيدة الموجات	Wave Trap
10- مانعة الصواعق	Surge Arrestor

والشكل 13-3 يظهر الشكل الحقيقى لهذه المهمات Equipment الموجودة داخل محطة هوائية على دوائر الدخول /الخروج فى منطقة الجهد العالي.

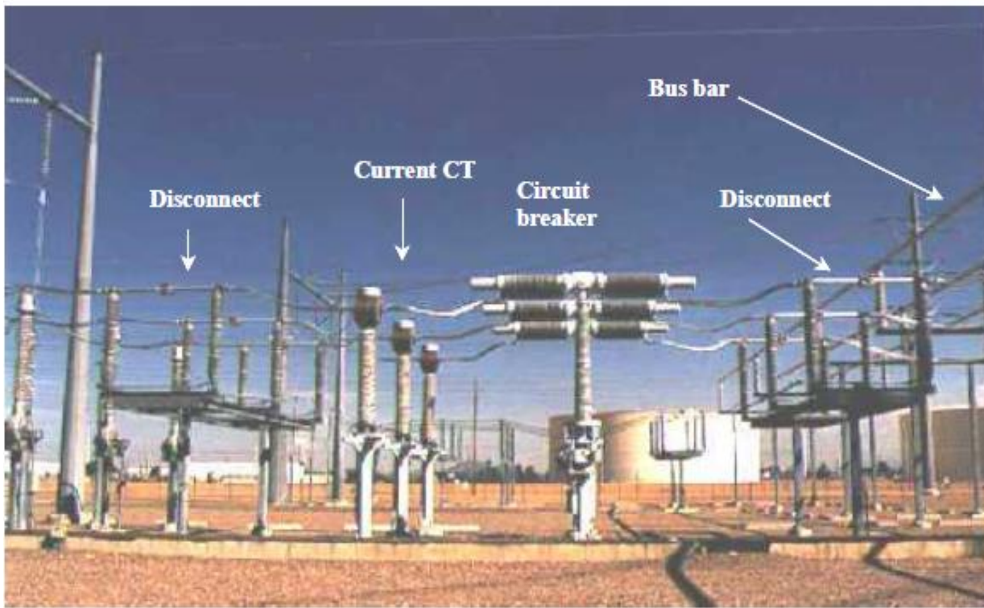


Figure 13-3 AIS

وفي الجزء الأول من هذا الفصل نعرض التفاصيل الفنية لكل عنصر من عناصر منطقة الجهد العالي فى المحطات الهوائية. ثم فى الجزء الثانى سنعرض نفس المكونات لكن فى محطات الـ GIS .

الجزء الأول من الفصل الثالث عشر

مهمات منطقة الـجهد العالي فى محطات الـــــ AIS

فيما يلى سنعرض أهم المهمات (المعدات) الموجودة فى هذه المنطقة:

13.2 مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR

هى أول عنصر يركب على خط الدخول الهوائى Overhead Transmission line بعد عبوره سور المحطة ، وبالتالى يظهر كأول عنصر على مخطط الـ SLD . أما إذا كان الدخول للمحطة بكابلات أرضية بدلا من الخطوط الهوائية فلن تكون هناك حاجة له ، إذ هو يستخدم لحماية المحطة من الصواعق البرقية التى يمكن أن تدخل إليها بعد اصطدامها بالخط الهوائى مسببة زيادة هائلة في الجهد وقد تدمر هذه الصاعقة المحطة إذا لم يتم منع دخولها بواسطة هذا الـ Surge Arrestor (Lightning Arrestor, LA) .

وتتميز مانعة الصواعق بارتفاع مقاومتها جدا فى الظروف الطبيعية والجهود العادية ، وبالتالى يكون التيار خلالها تقريبا يساوى صفر ، أما فى حالة الجهود العالية الخاطفة Impulse Voltgaes (مثل لحظات الصاعقة) فتصبح مقاومتها صغيرة جدا ومن ثم تسمح بمرور تيار عالى فتتسرب الصاعقة خلالها قبل الدخول للمحطة.

والشكل 13-4 تظهر شكلها فى الواقع العملى.



Figure 13-4 LA

والشكل 13-5 يظهر علاقة الجهد والتيار خلالها. لاحظ أن التيار يساوى صفرا مع القيم المنخفضة للجهد (normal operationg region) ثم فجأة يرتفع لقيمة عالية مع ارتفاع الجهد عن حد معين (lightening surge region) ،

النقطة الهامة التى يجب أن تذكر هنا أن التيار يعود مرة أخرى للصفر بمجرد انخفاض الجهد ، أى أن المنحنى فى الشكل 13-5 يمكن أن تبدأه من أى جهة شئت.

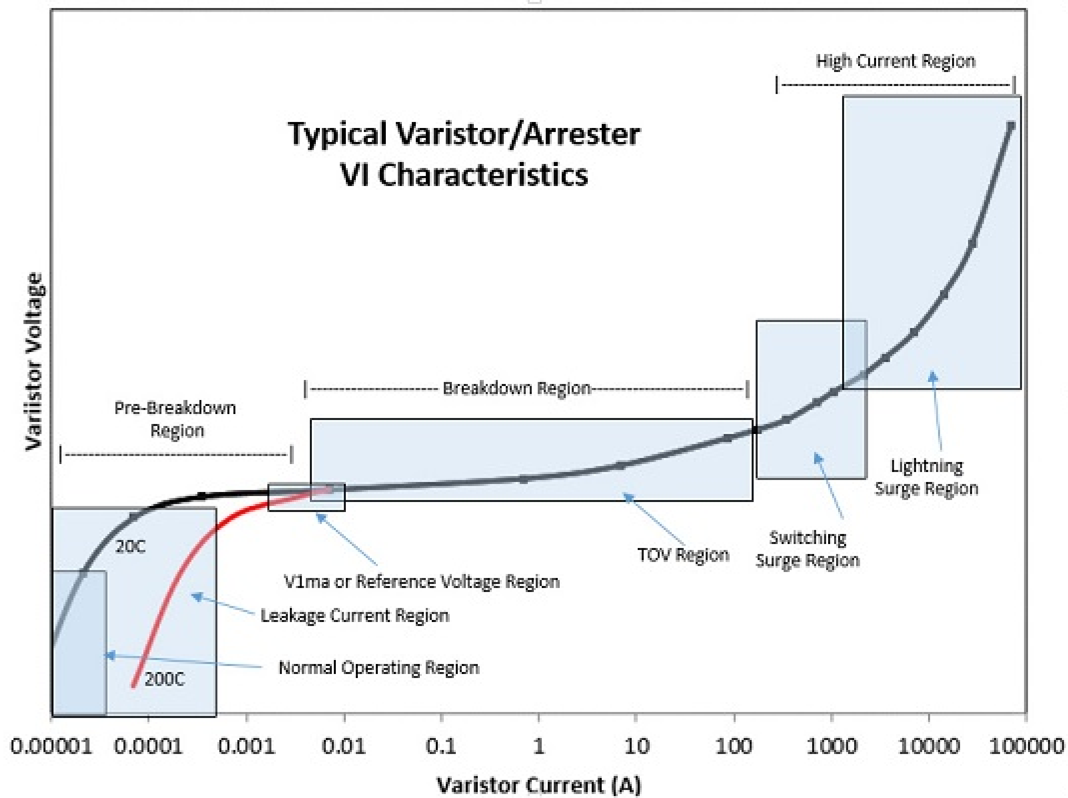


Figure 13-5 Charactristic of LA

وهناك نوعين من مانعة الصواعق:

1- Conventional Gapped Arrester (Valve Type Arrester)
2- Metal-Oxide (ZnO) Arrester

13.2.1 النوع الأول : (Valve Type Arrester)

هو مانع من النوع الصمامى ، ويتكون هذا النوع من Non Linear Resistor Element مركب على التوالي مع Spark Gap كما فى الشكل 13-6.

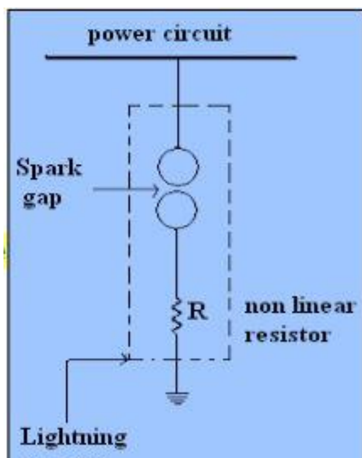


Figure 13-6 Valve Type LA

أما الـ Non-linear Resistance فتكون قيمتها كبيرة جداً فى الحالة العادية أى عند جهد الشبكة الطبيعى .

وأما الـ Gap Unit فيكون لديه فراغ Gap بمسافة معينة ، بحيث يكون الـ Arrestor غير قادر على توصيل التيار فى الحالة العادية. وعند حدوث الصاعقة يزداد الجهد بصورة كبيرة و ينكسر عزل الهواء فى الـ Gap و تصبح قيمة المقاومة صغيرة جداً و يتم تفريغ التيار للأرض.

وقد تم استخدام هذا النوع لعدة عقود من الزمن حتى ظهر النوع الثاني وهو الـ Metal–Oxide Arresters فى منتصف سبعينات القرن الماضى.

13.2.2 النوع الثاني : Metal-Oxide (ZnO) Arrester

هو مانع يستخدم أكسيد الزنك ، ففى هذا النوع تم استبدال الـ Non–linear Resistance المصنعة من كربونات السيليكون Silicon–Carbide بأخرى من Metal–Oxide التى تتمتع بـ Non–linearity characteristics أعلى من نظيرتها. وتم أيضا الاستغناء عن Series Gap فى هذا النوع و بذلك يكون قد قضى على مشكلة الحرارة المرتفعة التى كانت تنتج من حدوث breakdown للـ spark gaps ، كما يقلل من إحتمالات الفشل التى كانت تحدث نتيجة لتغير الـ breakdown voltage الخاص بالـ spark gaps بسبب تغير أحد الظروف مثل الضغط أو درجة الحرارة أو التلوث.

و يصنع هذا النوع عادة من أكسيد الخارصين (Zinc Oxide) الذي يمتاز بانهيار مقاومته عند قيمة محددة للجهد ثم استردادها مرة أخرى عند انخفاض هذه القيمة ، مما يوفر حماية و أداء أفضل للـ arrestor.

وتزود هذه الأجهزة بعدادات كما فى الشكل 13–7 لقياس تيار الصاعقة و لحصر عدد المرات التى مرت فيها الصواعق خلاله وهذه المعلومات هامة فى تقييم صلاحية الـ LA.

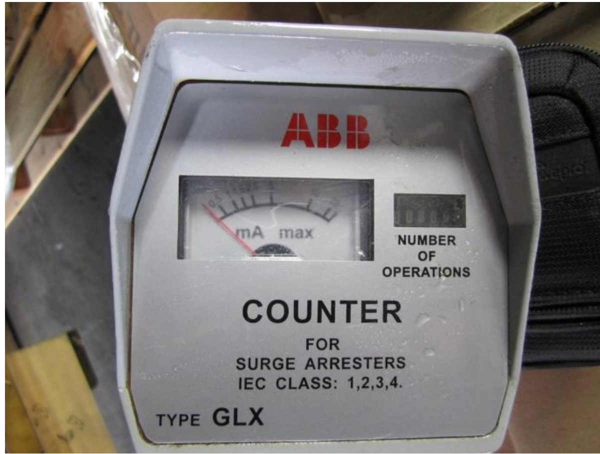


Figure 13-7 عداد مركب على مانع الصواعق

و يجب تغير مجموعة الأقراص (التى تتكون منها المقاومة الغير خطية) الموجودة داخل مانعة الصواعق بعد عدد معين من مرات التفريغ و هذا العدد يتم تحديده بواسطة الشركة المصنعة. وإذا لم يتم استبدال و فحص الأقراص فقد نتفاجأ بحدوث صاعقة وتنهار مانعة الصواعق و المعدة معها.

كذلك يوجد عداد آخر لقياس تيار الـ SS معاير بالمللى امبير ، وفى حالة زيادة هذا التيار بمرور الوقت فإن هذا قد يكون مؤشرا للانهيار الحرارى لمانعة الصواعق وعوازل الخط الكهربى أيضا.

علما بأن الـ LA قد يوضع أيضا ليس فقط عند نقطة دخول الخطوط الهوائية للمحطة بل أيضا يوضع مباشرة قبل المحول وذلك لوجود إحتمال أن الصاعقة ضربت أى عنصر من عناصر المحطة الموجودة فى منطقة التفريعات (بالهواء الطلق) وبالتالى فهناك إحتمال أن تصل للمحول (وهو العنصر الأهم والأغلى بمحطة المحولات) ولذا وجبت حمايته بـ LA إضافى كما فى الشكل 13–8.



مانعة صواعق قبل الدخول على المحول الرئيسي Figure 13-8

13.3 سكاكين الفصل ISOLATORS

سكاكين الفصل وتسمى أيضا بالمستعزل Isolator ، وتسمى أيضا Disconnecting Switch ، وهى جهاز ميكانيكى يستخدم أساسا لإتمام عملية العزل التام لعناصر الدائرة عن مصدر الطاقة بغرض القيام بأعمال الصيانة ، ففتح الـ CB مثلا لا يكفى لبدء أعمال الصيانة فيه ، فرغم أن الخرج له قد أصبح صفرا إلا أنه مازال متصلا بمصدر الجهد ، وهنا يأتى دور السكينة التى تفتح لإتمام عزل الـ CB عن الـ BB .

وبالمحطة عدة أنواع من السكاكين ، فهناك سكينة الخط Q_{Line} ، أو سكينة رأس الخط ، وهناك سكينة أخرى تشبهها تماما تسمى سكينة الـ BB ، ورمزها على الشكل 13–9 هو (QL1 and QL2) ، والفرق بين سكينة رأس الخط وسكينة الـ BB هو أن سكينة الخط تكون مزودة بمفتاح أرضى Earthing Switch من جهة الخط الهوائى QE2 and QE3 ، بحيث أنه بمجرد أن تفتح سكينة الخط يتم أوتوماتيكيا توصيل هذا الخط بالأرض من خلال الـ Earthing Switch .

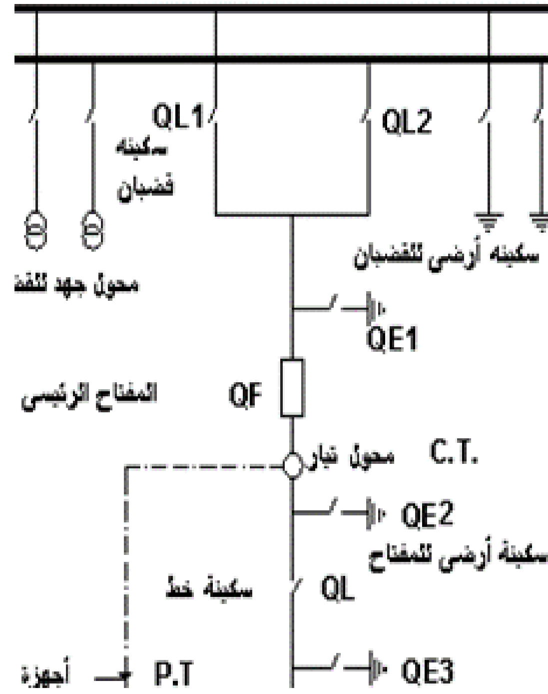


Figure 13-9 أنواع مختلفة من السكاكين

ولهذه السكاكين ميزة فى المحطات الهوائية حيث تمكنك من التأكد من تحقق العزل بالعين المجردة ، وذلك بعد إجراء فصل الدائرة بالقاطع CB .

وتستطيع هذه السكاكين توصيل الـ short circuit current لمدة قصيرة ، ولكن لا يمكن فتحها إلا عندما يتم قطع التيار عن الدائرة بواسطة القاطع الأساسى ، أو أن تكون قيمة التيار قبل القطع صغيرة جداً حيث أن هذه السكاكين غير مزودة بأى وسيلة لإطفاء الشرارة الناتجة عن قطع تيار مرتفع كما هو الحال فى الـ CB. كما

يلاحظ أن سرعة الفتح والغلق للـ Isolators تكون دائما أبطأ بكثير مقارنة بالقواطع .

وعادةً تكون السكينة أو الـ Isolator مركب على جانبي الـ CB ، ويوجد نظام قفل كهربي (Interlock) بين الـ CB وبين الـ Isolator ، بحيث يضمن عدم فتح الـ Isolator إلا بعد فصل الـ CB ، وذلك بسبب أن الـ Isolator لا يمكنه كما ذكرنا إطفاء الشرارة الناتجة بسبب فصل التيار الكهربي ، وهو غير مهيأ لذلك فلا يوجد به زيت مثلا لإطفاء الشرارة كما فى الـ CB ، وبالتالى لا يمكن فتحه إلا بعد فتح الـ CB أولا ، أما فى حالة غلقه فيجب أن يغلق هو أولا قبل أن يغلق الـ CB ، وذلك لضمان عدم وجود أى تيار فى الدائرة لحظة الغلق .

وتنقسم هذه السكاكين من حيث أسلوب الفتح إلى عدة أنواع (يتم الاختيار بينهم حسب المساحة المتاحة للفتح وطريقة التثبيت) منها:

- Vertical Break
- Double End Break
- Center Break
- Double End Break Vee Type

Vertical Break

تتكون السكينة فى هذا النوع من ذراع واحد يتحرك عمودياً ، و طرفا السكينة يكون كل منهما مثبت على عازل كما فى الشكل 13-10. و يتم فتح الدائرة عن طريق رفع الذراع لأعلى كما فى الصورة التى تبين شكل سكينة جهد 500 ك ف.

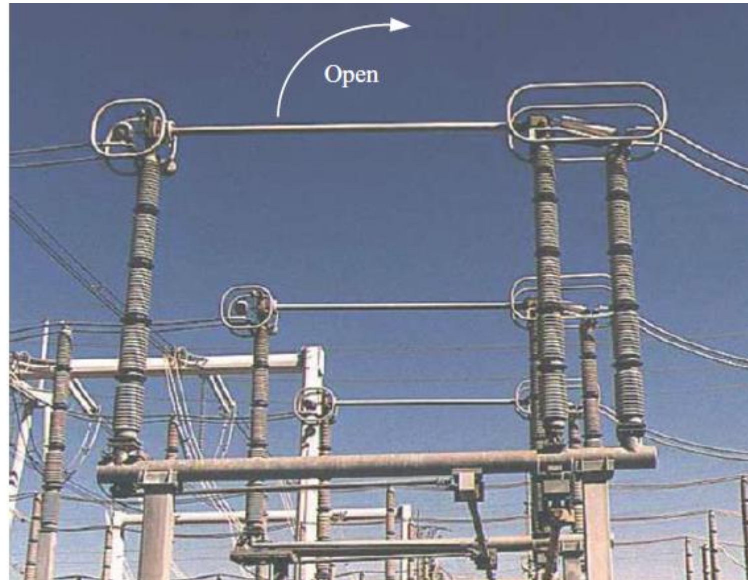


Figure 13-10 Vertical Break

Double End Break

تتكون السكينة من ذراع واحد يتم تحريكه من خلال العزل المثبت فى المنتصف (شكل 13-11) ، و يتم توصيل

الدائرة عن طريق توصيل الذراع بالطرفين الثابتين (المثبتان أيضا بعوازل).

ويمتاز هذا النوع على الـ vertical switch بأنه يمكن استخدامه فى المواقع التى ليس بها مساحات فارغة فى الاتجاه الرأسى حيث يتم فصل الدائرة عن طريق تدوير الذراع أفقياً و ليس رأسياً.



Figure 13-11 Double end break

Center Break

فى هذا النوع تتكون السكينة من ذراعين متقابلين يتحركان فى اتجاهين مضادين و يتم توصيل الدائرة عن طريق تلامس الطرفين فى نقطة تكون تقريباً فى المنتصف (شكل 13–12).

وميزة هذا النوع عن النوعين السابقين (vertical break & double end break) هو أنه يتكون من عدد أقل من العوازل " two insulator/phase" بينما النوعان السابقان بهما three insulator/phase (فى هذا النوع يحمل كل عازل نصف الذراع المتحرك وليس كامل الذراع كما فى النوعين السابقين). و لكن من عيوبها أنها تتطلب مسافة أكبر بين كل phase و الآخر مقارنة بالنوعين السابقين.



Figure 13-12 Center break

و هناك أشكال أخرى من السكاكين مثل Double End Break Vee Type هو يشبه فى تصميمه الـ Double End Break ولكن العازلان المثبتان على طرفى السكينة مائلان كما توجد أشكال أخرى مثل Pantograph Type و Knee Type.

13.4 مفاتيح التأريض : (EARTHING SWITCHES)

وهي المفاتيح المصاحبة للـ Isolators المتصلة بالخطوط (شكل 13-13) ، ويرمز لها بـ QE1 و QE2 كما فى الشكل 13-9 ، وتستخدم من أجل تأريض القاطع بعد فصله وعزله عن الدائرة (بغرض الصيانة مثلا) ، وهناك مفتاح تأريض الخط QE3 الذى يغلق بعد فتح القاطع لإجراء عمليات الصيانة والفحص.

علما بأن تأريض الخط بهذه الطريقة يحقق فاعلية فى حدود 2 كم من المحطة ، أما إذا امتدت منطقة الصيانة لأطول من ذلك فيجب عمل أرضى مؤقت فى المنطقة البعيدة خارج المحطة .

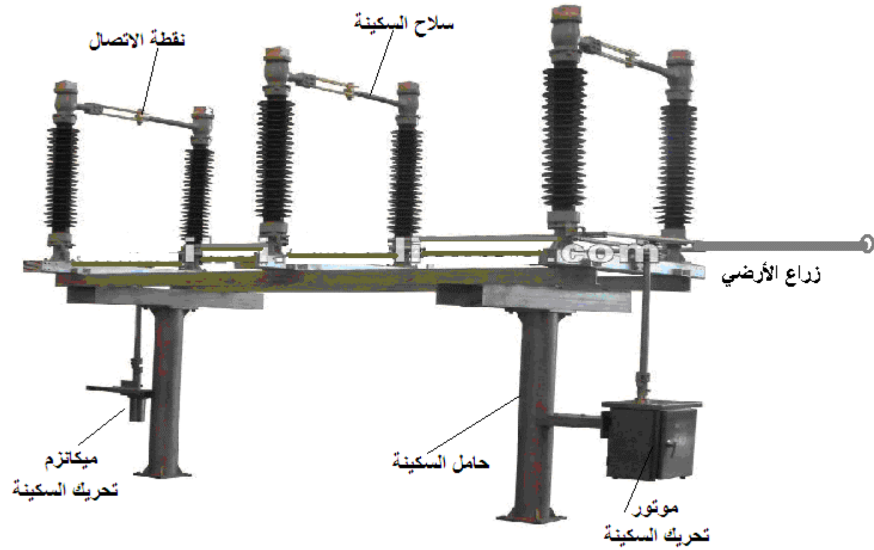


Figure 13-13 سكينة الأرضى

13.5 تسلسل عمليات الفصل و التشغيل فى المحطة

13.5.1 خطوات فصل خط هوائي (المغذى Feeder) يتبع الآتى:

1. فصل القاطع CB الرئيسي والتأكد من فصل الـ 3-Phases.
2. تفصل سكينة الخط الهوائية.
3. فصل سكينة القضبان .

ملحوظة هامة:

1 يراعى عند فصل أي كابل أن يتم الفصل من ناحية الحمل أولا ، ثم من ناحية المغذي (المصدر) بعد ذلك ، منعا لمرور تيار خلال سعات capacitance الكابل مما قد يؤدى لرفع الجهد كما ذكرنا سابقا فى الباب الثاني.

13.5.2 خطوات توصيل خط هوائي يتبع الآتى:

1. تفصل سكينة الأرضي للخط الهوائي مع التحقق من ذلك.
2. توصيل سكينة القضبان.
3. توصيل سكينة الخط الهوائية.
4. توصيل المفتاح الرئيسي والتأكد من توصيل الثلاث أوجه.

13.5.3 تشغيل مجموعتان من القضبان الرئيسية

- وفى حال وجود موصل قضبان وعند الرغبة في نقل جميع التوصيلات من القضبان الموجودة بالخدمة إلى الاحتياطية دون انقطاع التغذية يتبع الآتى:

1. توصيل سكينتي رابط القضبان.
2. توصيل موصل القضبان.
3. تقرأ الفولتميترات المركبة على مجموعة القضبان الاحتياطية للتأكد من وجود فولت عليها.
4. يتم التحقيق من توصيل موصل القضبان.
5. توصيل سكاكين القضبان الاحتياطية لجميع الدوائر الموصلة إلى مجموعة القضبان الشغالة.
6. تفصل سكاكين القضبان الشغالة لجميع الدوائر الموصلة.
7. يقرأ الأمبير والميترات المركبة على موصل القضبان للتحقق من عدم مرور بين مجموعتي القضبان.
8. يفصل مفتاح رابط القضبان.
9. تفصل سكينتي رابط القضبان.

13.5.4 ما الفرق بين فصل الخط ، عزل الخط ، وانسحاب الجهد؟.

يوجد فرق بين مصطلح "فصل الخط" المغذى (Feeder) ، ومصطلح "عزل الخط" على النحو التالى:

أ. فصل الخط يعنى فتح القاطع CB ، و لكن تظل سكاكين العزل مغلقة (سكينة الخط و سكينة القضبان العمومية) وتظل سكاكين التأريض مفتوحة. وهذا السيناريو يحدث إذا جاءت إشارة الفتح من الـ Relay ، لأنه من الممكن أن يلى ذلك إشارة غلق من الـ Autorecloser ، فلو تخيلنا أن فصل الخط كان مصاحبا مثلا فغلق سكاكين التأريض فهذا يعنى كارثة.

ب. عزل الخط (المغذى Feeder) يعنى فتح القاطع CB ، و فتح سكاكين العزل (سكينة الخط و سكينة القضبان العمومية) ، و غلق سكاكين التأريض فى أول الخط و نهايته. وهذا يحدث عن عمل صيانة للخط.

أما انسحاب الجهد فنقصد به أن انقطاع التيار تلقائيا دون سابق تعليمات لا من الـ Realy ولا من مسئولى الصيانة كما فى الحالتين السابقتين ، بل انقطاع التغذية عن قضبان التوزيع و الخطوط الهوائية و الكابلات الأرضية و سائر المعدات الكهربية دون سابق تعليمات وبدون حدوث عطل داخل المحطة .

وتعتبر هذه المعدات فى هذه الحالة في حكم المغذاة ، ولا يجوز بأي حال من الأحوال الاقتراب منها أو العمل فيها أو إعادة تعشيقها – إلا بعد الحصول على التصريح اللازم من الجهة المشرفة على تشغيل هذه المعدات (مركز التحكم المختص أو وردية المحطة).

13.6 محولات التيار CURRENT TRANSFORMER

وهو من المعدات الأســاســية بالمحطة ، حيث يقوم هذا النوع من المحولات بتحويل التيارات العالية إلى تيارات منخفضــة عادة 1 أمبير أو 5 أمبير لنتمكن من التعامل مع هذا التيار بشــكل آمن ســواء فى أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية. ويتم تصنيف محولات التيار إلى (Classes) و ذلك حسب الاستخدام (للحماية أو للقياس).

و يركب الـ CT بشكل منفصل لاسيما مع الجهود العالية كما فى الشكل 13–14.



Figure 13-14 CT

لكن هناك شـــكل آخر من أشـــكال محول التيار وهو (Bushing Current Transformer, (BCT وفيه يتم تركيب الـ CT ضمن العوازل الخارجية Bushing للمحول أو القاطع.

ويتميز هذا النوع بميزة أساسية و هى أنه يمكن تركيبه على الخط أو محول القدرة أو القاطع الموجود بالفعل دون الحاجة لتركيبه منفصلا . وذلك لأن الــ CB يركب على التوالي فى الدائرة وكذلك الـــ CT ولذا يركبا معا فيدخل الكابل على الـ CT ومنه (داخليا) إلى الـ CB ثم يخرج من الـ CB إلى سكينة الـ BB كما سنرى.

وتنقسم محولات التيار لعدة أنواع طبقاً للمادة المستخدمة للعزل داخل المحول . وأهم تلك الأنواع:

1- Oil Insulated Type

2- SF6 Insulated Type

3- Dry Insulated Type

للمزيد عن محولات التيار وأيضا عن محولات الجهد يمكن الرجوع لكتاب نظم الحماية الكهربية.

13.7 محولات الجهد

ويقوم هذا النوع من المحولات بتحويل الجهود العالية إلى جهود منخفضة (عادة 110 فولت) لنتمكن من التعامل مع هذه الجهد بشكل آمن مع أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية .

و يستخدم محول الجهد فيما يلي :

- تغذية أجهزة القياس مثل (VAR meter Wattmeter، Voltmeter)

- تغذية أجهزة الحماية (Protection Equipment)
- تغذية مسجل الأخطاء (Fault Recorder) ، ووظيفة هذا الجهاز داخل محطة التحويل أنه يسجل التيارات والجهود قبل وخلال وبعد حدوث العطل ، وكذلك لحظة فصل القاطع ، كما يسجل اللحظة التي تعطلت فيها الأجهزة.
- تغذية أجهزة التوافق (Synchronizers) حيث يشترط في عمليات التوافق : تساوي الجهد ، تساوي التردد ، توافق الـ Phases and Sequences ، و تستخدم في محطات التحويل لإغلاق الدائرة عن بعد من غرفة التحكم فقط.



Figure 13-15 VT

والفرق بين نوعى محولات القياس (محول التيار ومحول الجهد) هو أن محول الجهد لا نحتاج معه لقطع الكابل كما فى حالة محول التيار الذى يدخل التيار إليه من نقطة ويخرج من نقطة أخرى.

أما فى محولات الجهد فيتم التوصيل من نقطة واحدة (توصيل على التوازى) كما فى الشكل 13-15 بينما الطرف الثاني لمحول الجهد يكون عبارة عن سلك توصيل صغير المقطع (يحمل جهد لا يتجاوز 120 فولت وتيار ضعيف) وهذا السلك يتصل مباشرة بأجهزة الحماية والقياس داخل مبنى المحطة.



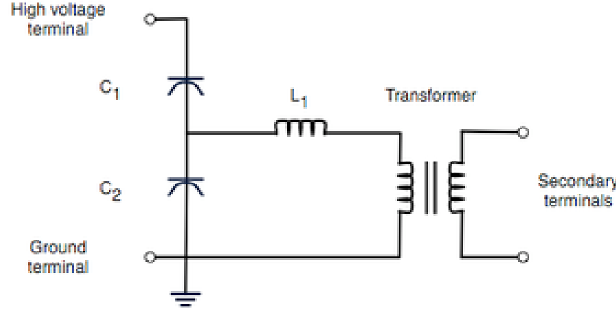
Figure 13-16 CVT

ومن أشهر أنواع هذه المحولات:

1. محولات الجهد الحثية (I.V.T). Inductive VT كما فى الشكل 13-15.
2. محولات الجهد السعوية (C.V.T) Capacitive VT. كما فى الشكل 13-16.

يستخدم الـ CVT لخفض جهد الشبكة الفائق EHV إلى مستوى جهد معدات القياس و الحماية.

وتقوم فكرة الـ CVT على توصيل الجهد المراد خفضه على مكثفان على التوالي two capacitors in series (شكل 13–16) فيكون بذلك الجهد على أحد المكثفين أقل من الجهد الكلى ثم نقوم بتوصيل ذلك الجهد على الملف الابتدائى للمحول و الذى بدوره يقوم بتخفيضه إلى القيمة المطلوبة. وهذا النوع أفضل اقتصادياً من محول الجهد العادى عند استخدامه على خطوط EHV & UHV.



وقد أصبح شائعا استخدام محولات الجهد السعوية CVT لسببين:

الأول: أنها أقل تكلفة عن محولات الجهد المغناطيسية .

الثاني: أن المكثف Capacitor الموجود بها يؤدى وظيفة أخرى حيث يعمل في نفس الوقت كمكثف ربط Coupling Capacitor لنظام الاتصال بالموجات المحمولة على خطوط نقل الطاقة Power Line Carrier PLC والذي أصبح استخدامه ضروريا لأغراض الاتصالات وربط أجهزة الحماية في المحطات بأجهزة الحماية في المحطات المقابلة والذي يطلق عليه Tele Protection. راجع تفاصيل ذلك فى القسم الخاص بالاتصالات فى الفصل الأخير من هذا الباب.

وتتعدد أشكال محولات الجهد حسب مكان استخدامه. فالصور السابقة تمثل محولات الجهد فى المحطات الهوائية وفي الشكل 13–17 صور لمحولات الجهد فى المحطات الغازية ولوحات الجهد المتوسط.



Figure 13-17 أشكال مختلفة لمحولات الجهد

13.8 محولات التأريض (EARTHING TRANSFORMER)

معظم محولات التوزيع تكون مؤرضة تأريضا مباشرا (SOLID EARTHING) أي بتوصيل نقطة التعادل مباشرة بالأرض مما يجعل تيارات الأعطال مرتفعة القيمة ، وذلك من أجل أن تميزها أجهزة الحماية بسهولة ولتقليل الإجهاد الكهربي على العوازل والمعدات .

فإذا كان المحول موصلا على شكل دلتا فيمكن تأريضه ولكن من خلال محولات التأريض التى تكون على شكل زجزاج كما فى الشكل 13−18 الذى يمثل مرور التيار خلال عطل أرضى من النوع الـ SLD والذى كان من المستحيل رجوعه للمحول سوى من خلال المكثفات الشاردة ، أما عند استخدام محول الزجزاج فقد أمكن تمريره كما فى الشكل. ويمكن الرجوع لكتابى المرجع فى محولات القوى لمزيد من التفصيل حول هذه النقطة.

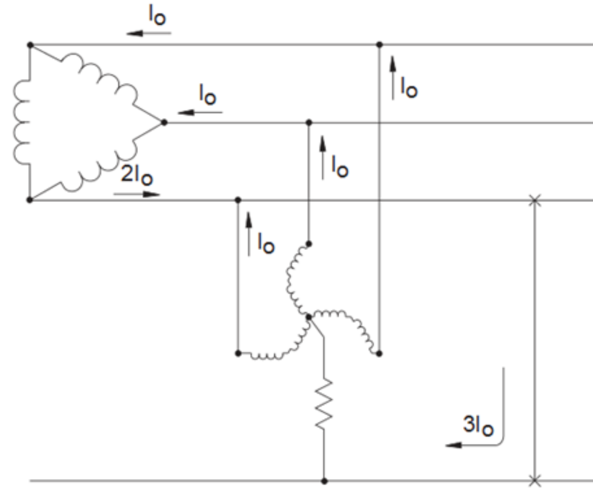


Figure 13-18 توصيلة الزجزاج

و محولات التأريض تستخدم عادة في محطات النقل الفرعية لأن المحولات فيها عادة تكون متصلة دلتا / ستار ، وقد نحتاج فى جهة الدلتا لرفع قيمة الـ Zero Sequence Impedance لخفض قيمة التيار في حالة حدوث أعطال أرضية ، و لذا تستخدم محولات التأريض في هذه الحالة للحد من قيمة تيارات القصر الأرضية إلى قيمة التيار المقنن وتستخدم للتأريض فقط وليس للتحميل عليها.



Figure 13-19

ويمكن تمييز محولات التأريض بأن لها أربعة نقاط دخول فقط وليس لها خروج كما فى الشكل 13-19. (المحولات العادية يكون لها نقاط دخول للجهد الابتدائى ونقاط خروج للجهد الثانوى).

ويتم تحديد الـ Ratings لهذه المحولات بحيث تتحمل مرور التيارات الأرضية لمدة أقصاها خمس دقائق ، ويجب أن تعمل أجهزة الحماية قبل ذلك بكثير ويتم توصيل هذه المحولات بأرضي المحطة.

13.9 القواطع CIRCUIT BREAKERS

قاطع الدائرة هو المسئول عن فصل وتشغيل الدائرة أتوماتيكيا بناء على إشارة من جهاز الحماية Protective Relay وذلك فى حالة الأعطال الطارئة ، كما يستخدم لفصل وتوصيل التيار الكهربي للمعدات الكهربية في الظروف الطبيعية أيضا عند الحاجة للصيانة أو التركيبات الإضافية ، ولكن الإشارة فى هذه الحالة لا تأتى من الـ Relay ، بل تأتى يدويا للقاطع.

وأحد أهم ميزات القواطع هى القدرة على إطفاء الشرارة التي تحدث عند انفصال الجزء المتحرك (Moving Contact) عن الجزء الثابت (Fixed Contact) الموجودين داخل القاطع أثناء فصل الدائرة في الحالات العادية أو في حالة حدوث عطل. وتتميز الـ CB بهذه الميزة عن السكاكين التى ذكرناها سابقا.

و الشرارة التى تنشأ داخل القاطع تمثل أكبر عقبة تواجه تشغيل هذه القواطع ، وهى ليست مشكلة سهلة ، فعند انفصال الـ Contacts داخل القاطع يحدث فرق جهد بينهما (حسب جهد تشغيل القاطع) لكنه غالبا يكون كافيا لكسر العزل بين طرفى القاطع لاسيما أن المسافة بينهما صغيرة ، ومن ثم يمر تيار هائل بين طرفى القاطع على شكل قوس كهربى أو Arc ، وهذا التيار يتسبب فى سخونة شديدة للمنطقة بين الـ Contacts ، ومن ثم يتبخر الزيت مثلا (كما فى القواطع الزيتية) ، أو يتأين الهواء بينهما (كما فى القواطع الهوائية) ويكون الجهد كافيا لبقاء هذا القوس وبالتالى استمرار توصيل الدائرة مالم نستخدم طرقا أخرى لتساعد القاطع على قطع الشرارة.

والعلاقة التالية تعطى فكرة عن حجم الطاقة الهائلة التى تتولد داخل القاطع لحظة تباعد الـ Contacts الخاصة به:

القدرة الكهربية بالشرارة (مقاسة بالكيلوجول) = قدرة القاطع (MVA) × زمن الشرارة (بالثانية) × 0.1

على سبيل المثال لو كانت قدرة القاطع (Short circuit capacity) تساوى 500 MVA ، وزمن فصل الشرارة هو 0.04 sec ، فإن القدرة الكهربية المستنفذة بالشرارة تساوى

$$500 \times 0.04 \times 0.1 = 2000 \text{ k Joule}$$

وهى قيمة هائلة تستلزم أخذها فى اعتبارات كثيرة منها المادة التى يصنع منها جسم القاطع.

13.9.1 أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربية:

القاطع عموما يحتوى فى داخله على نقاط تلامس ثابتة ، ونقاط متحركة كما ذكرنا.

وإذا أردت تفصيلا أكثر نقول : أن النقاط المتحركة مكونة هى الأخرى من جزءين : الجزء الأول يمثل نقاط تلامس رئيسية Main Contacts يمر خلالها التيار فى الوضع العادى ، والجزء الثاني يمثل نقاط تلامس المساعدة Auxilary Contacts يمر خلالها التيار فى اللحظة التى تسبق مباشرة عملية انفصال نقاط التلامس. ويمكن من الشكل 13–20 فهم هذه العملية :

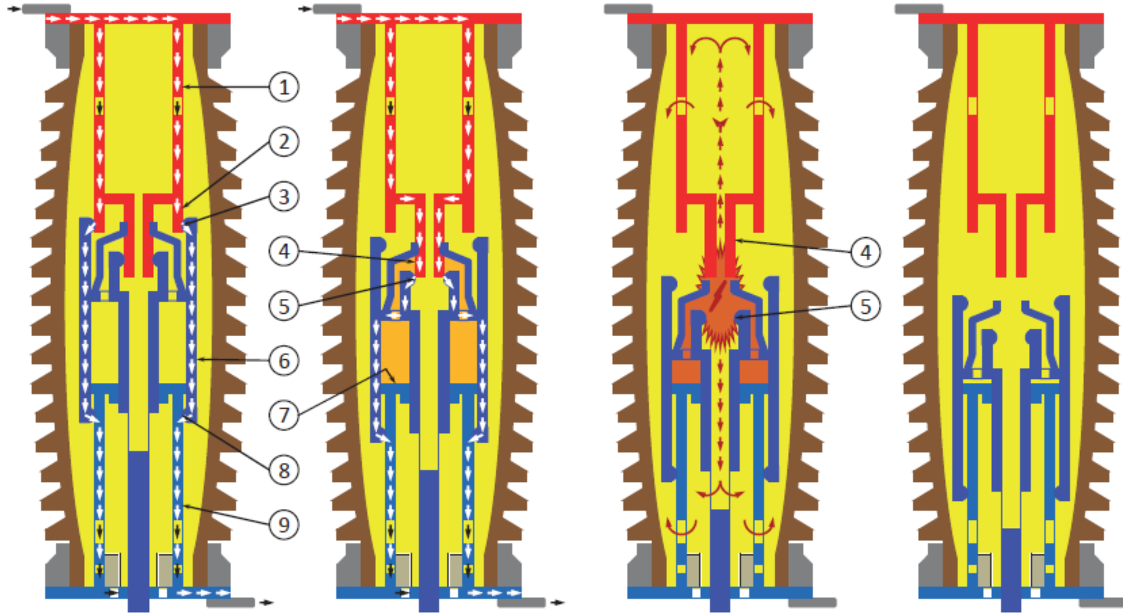


Figure 13-20 آلية القطع

ففى وضع التوصيل الطبيعى (الرسم أقصى اليسار) ، تجد نقاط التلامس الثابتة (رقم 2) تلامس الجزء الأول من نقاط التلامس المتحركة الرئيسية (رقم 3). وعندما يأتى أمر بالفصل ، تجد أن النقاط 2 و 3 السابقتين قد انفصلا لكن بدون حدوث أى شرارة بينهما وذلك لأن التيار لايزال يجد مسارا بديلا من خلال نقاط التلامس الثابتة (رقم 4) والجزء الثاني من نقاط التلامس المتحركة (رقم 5) ، كما فى الشكل الثاني من اليسار ويسميان بالأطراف المساعدة Auxilary Contacts.

وهذه النقطة هامة جدا لأن عملية فصل الـ Main Contacts (2 و 3) بدأت فعليا وانتهت ولكن بدون حدوث شرارة فيهما ، مما يوفر حماية لهما من التآكل ومن ثم لا تتكون مقاومة عالية على سطحهما.

وتستمر عملية الفصل فى الشكل الثالث لكن هنا تظهر الشرارة بين الأطراف المساعدة Auxilary Contacts ، ويتدخل نظام إطفاء الشرارة (حسب نوع القاطع) ليتم بأسرع ما يمكن إنهاء هذه الشرارة حتى نصل للوضع المرسوم فى الجزء الأخير من الشكل 13–20.

13.9.2 الأجزاء الرئيسية بالقاطع

يمكن النظر للأجزاء الرئيسية بالقاطع من زاوية أخرى ، حيث يمكن القول أنها ثلاثة أقسام:

1. **حجرة الإطفاء**(Extinguishing Chamber): حيث يتم إطفاء الشرارة.
2. **الوسط العازل**: وهناك عدة أنواع من العزل:
   - غاز الـ (SF6)
   - الزيت
   - وهناك بالطبع الوسط المفرغ من الهواء
3. **قوة محركة (Mechanism)**: تعمل هذه القوة على تحريك الجزء المتحرك في القاطع لينفصـــل عن الجزء الثابت بســـرعة ، حيث نحتاج فى القواطع أن يكون زمن الفصــــل فى حدود 50 ms وزمن التوصيل فى حدود 100 ms.

13.9.3 آليات الحصول على القوة المحركة:

هناك ثلاث آليات للحصول على الحركة القوية اللازمة لفتح القاطع:

- **آلية تحريك زنبركية Spring Operated C.B (سوستة فقط تشحن يدويا أو بمحرك كهربى):**

ويستخدم فى هذا النوع محرك تيار مستمر أو متردد بحيث يقوم بشحن سوستة الزنبرك المستخدمة فى عمليات الفصل والتشغيل . ومن الممكن تشغيل المفتاح يدويا في حالة وجود عطل بمحرك D.C مع ملاحظة وجوب فصل الجهد فى هذه الحالة عن طرفي المفتاح وكذلك فصل تغذية الموتور.

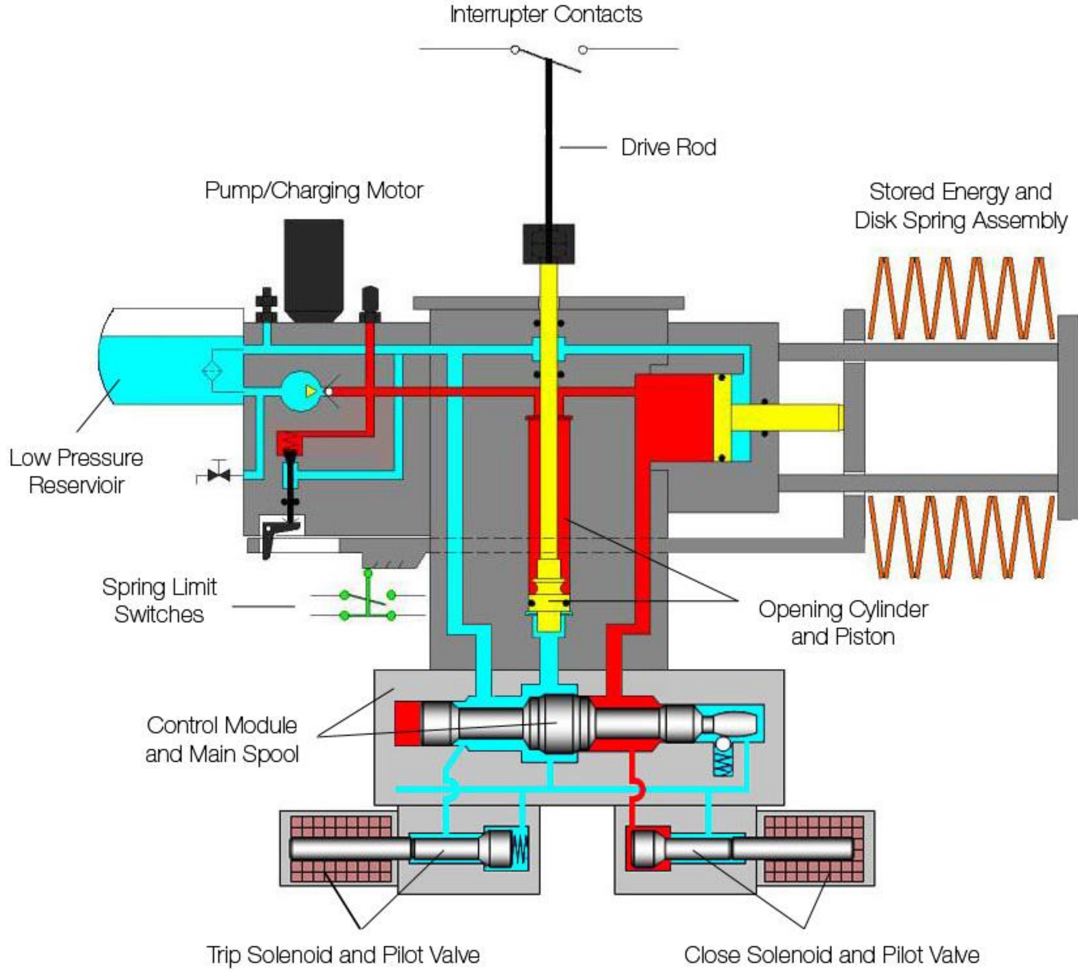
- **آلية تحريك هوائية Pneumatic C.B**

وهو يســـتخدم في المفاتيح الهوائية ذات الضـــغوط العالية (66/220 ك.ف) ويعتمد على الهواء المضغوط في الفصل والتوصيل حيث يصل هذا الضغط إلى 17 بار عن طريق الـ (Compressor) و عند الفصل أو التوصيل يتم تحرير هذا الضغط و توجيهه إلى المكبس (Piston) ويقوم هذا المكبس بدوره بتحريك الجزء المتحرك إما وصلا أو فصلا حسب الأمر المعطى.

- **آلية تحريك هيدروليكية Hydraulic C.B**

ويستخدم في المفاتيح التي يستعمل فيها غاز SF6 (الغازية) لإطفاء الشرارة ويعتمد على الزيت الهيدروليكي ذو المواصفات الخاصة . والصورة التالية تظهر السوستة spring ومتور الشحن وخزان الزيت.

وعموما ، فمعظم القواطع تكون عادة مزودة بآلية التحريك الزنبركى حيث تتميز بدرجة عالية من الأمان عند التشغيل وعمر افتراضى أطول وصيانة قليلة.



13.10أنواع القواطع بالمحطات

هناك عدة أنواع من الـ CBs المستخدمة في محطات التحويل حسب قدراتها والجهود التي تعمل عليها ، منها:

- Oil C.B ويستخدم مع الجهود kV (3.6 - 12) .
- Air break C.B ويستخدم مع الجهود حتى 12 kV.
- Vacuum C.B ويستخدم مع الجهود حتى 36 kV.
- SF6 C.B ويستخدم مع الجهود kV (36-420) .
- Air blast C.B ويستخدم مع الجهود kV (245-1000) .

13.10.1النوع الأول : Oil CB

وفكرة عمله أنه عندما يتولد القوس الكهربى داخل القاطع تنتج طاقة حرارية تتسبب فى تحلل للزيت وبالتالى تتولد فقاعات غازية داخل الزيت . و بزيادة الضغط داخل القاطع تندفع هذه الغازات المحبوسة وتسبب اضطراب في الزيت مما يؤدى إلى إطفاء القوس الكهربي.

والغازات الناتجة تتصاعد إلى أعلى الخزان وتخرج من فتحات التهوية أعلى الخزان ، ولذلك فإنه إذا كانت هذه الفتحات مسدودة فقد يحدث انفجار للخزان.

علما بأن هذه الفقاعات تكون ذات ضغط عالي وهذا يولد ضغطا على جسم الخزان لذا يجب أن يكون جسم الخزان قويا ليتحمل هذا الضغط ، كما يجب ألّا يُملأ الخزان بالكامل بالزيت ، بل يجب ترك مساحة لهذه الفقاعات داخل الخزان.

ويعيب هذا النوع أن الزيت يكون قابلا للاشتعال عند درجة الحرارة العالية ، ويعيبه أيضا تكون الكربون بعد كل عملية إطفاء ، و بالتالى تزيد الحاجة إلى تبديل الزيت أو تنظيفه (بناء على نتائج اختبار الزيت الذى يجرى كل فترة). ولكنه عازل جيد ولا يحتاج لضغط ، كما يتميز بأنه عندما يسخن نتيجة مرور تيار عالى فيه – وهو ما قد يسبب تأين لبعض الذرات – تقل كثافته فيرتفع لأعلى ويحل محله زيت بارد غير متأين (تدوير طبيعى) ، وأحيانا يستخدم معه مضخة (Pump) حتى تبعد الزيت المتأين ليحل محله زيت جديد بارد .

ويوجد نوعان من هذه القواطع (شكل 13–21) هما :

- Bulk Oil C.B (Dead Tank)
- Minimum Oil C.B (Live Tank)

ففي القواطع الزيتية الأولى Bulk Oil تكون نقاط الفصل مغمورة بالزيت داخل خزان معدنى كبير ، وتسمى القواطع ذات الخزان الكبير (dead tank breakers) . وسبب التسمية أننا نحتاج لعزل الأجزاء المكهربة داخله عن هذا جسمه المعدنى ، ولذا يستخدم فيه كمية ضخمة من الزيت للعزل وليس فقط لإطفاء الشرارة. ولا يزال البعض منها فى الخدمة كما فى الشكل 13–22.

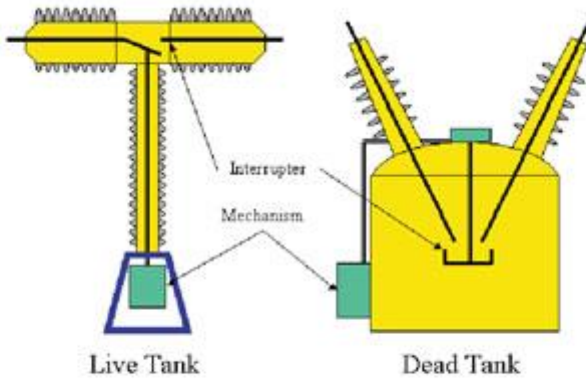


Figure 13-21

أما النوع الثاني فهو الأكثر انتشارا الآن ، حيث يستخدم الزيت فى إخماد القوس الكهربى فقط ، و ليس كعازل كما فى الـ Bulk Oil ، وفى المقابل يتم عزله برفعه عن الأرض من خلال Bushing كما فى النموذج الأيسر من الشكل 12–21 ، و يكون جسم الخزان فى هذا النوع مصنّعا من مادة عازلة و معزولة عن الأرض ويسمى Live Tank و وبذلك تقل كمية الزيت المستخدمة داخل الخزان. ونظرا لقلة كمية الزيت المستخدم فإنه أيضا يسهم فى الحد من خطورة وقوع الحرائق التى عرفت مع القواطع ذات الخزانات الكبيرة للزيت .

لكن القواطع الزيتية عموما تعانى من مشاكل كثيرة منها تسرب الزيت، وضعف مستوى العزل نتيجة تعدد مرات القصر ، و ارتفاع الضغط بداخله مع الفصل المتكرر نتيجة لتراكم أبخرة الزيت ويحتاج لصيانة دورية بمعدل مرتفع.

ملحوظة:

يجب عدم إعادة تشغيل قاطع التيار الزيتى إلا بعد مرور عشر دقائق على الأقل بعد فصل العطل ليسمح بتشتت الغازات المتولدة داخله وحتى يبرد الزيت

كذلك يجب فحص الزيت بعد عدد معين من مرات التشغيل في حالة الأعطال.



Figure 13-22 Dead Tank

13.10.2النوع الثاني Air Blast CB :-

يستخدم مع هذا النوع من القواطع ضاغط هواءAir Compressor لدفع الهواء عند حدوث شرارة لإطفائها



Figure 13-23 Air CB

(شكل 13-23) . ففي الظروف العادية يكون الهواء داخل القاطع الكهربي مضغوطا ، وهذا يعنى ارتفاع قيمة عزل الهواء (العازلية تتناسب طرديا مع الضغط) وبالتالى يمكنه تحمل جهد الشبكة على أطرافه ، ولكن عندما تنفصل نقاط التلامس داخل القاطع تتعرض الفجوة بينهما لمجال كهربي عالى وترتفع درجة الوسط لتصل إلى آلاف الدرجات المئوية مما يتسبب فى تأين الهواء العازل وحدوث القوس الكهربي. عند ذلك يندفع الهواء المضغوط أصلا داخله ليقطع الشرارة وتنخفض درجة القوس الكهربي وتختفي ظاهره التأين ويتم قطع التيار.

ولهذا النوع عدة مميزات عن القاطع الزيتى منها:

- لا وجود لأخطار الحريق التى يتسبب فيها الزيت.
- سرعة فصل فائقة.
- يحتاج إلى صيانة أقل من القاطع الزيتى.

لكن له عدة عيوب منها:

- عند الحاجة لعمليات الفصل المتعددة يجب تواجد Air Compressor ذو سعة كبيرة لإعادة الضغط داخله لقيمته العالية بعد كل عملية تشغيل.
- هناك احتمالية لتسرب الهواء من مواسير التغذية.

13.10.3النوع الثالث : القاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) :

فى هذا النوع (شكل 13–24) لا يوجد هواء مطلقا فى المنطقة المحيطة بأطراف القاطع الداخلية وبالتالى فلن تحدث شرارة بداخله. فهذا القاطع يتكون من اسطوانة مغلقة تحتوى على أطراف الوصل المتحركة داخل فراغ كامل ، فإذا تكون القوس الكهربائى نتيجة الفصل والاحتكاك فإنه سرعان ما يخمد لانعدام الوسط الداعم له كالزيت أو الغاز.

والقاطع يتكون من Arc chamber بداخلها نقط التلامس الثابتة والمتحركة ، ولكن يعيب هذا النوع من القواطع أنه إذا حدث أدني تسرب للهواء داخل القاطع فإنه يؤدي إلى حدوث شرارة كبيرة وانفجار لأقطاب القاطع.

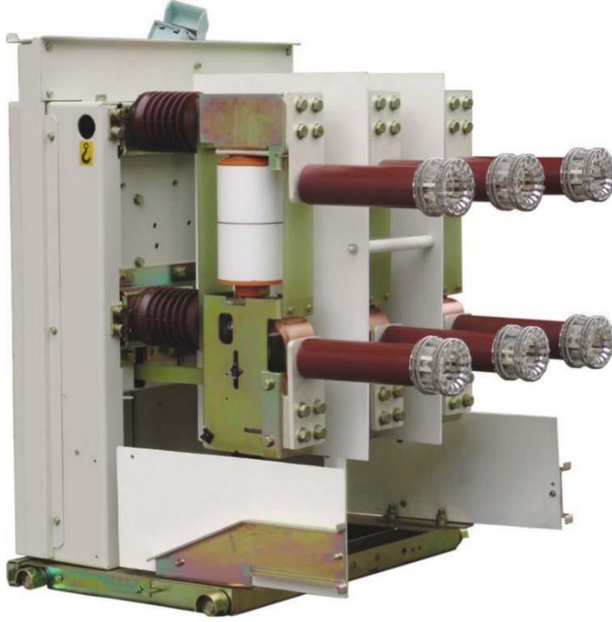


Figure 13-24 VCB

ويكثر استخدام هذا القاطع في محطات الجهد المتوسط حتى جهد 33 ك ف وليس أكثر من ذلك فى الوقت الحالى.

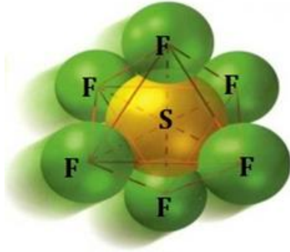
يتميز هذا النوع بارتفاع عدد مرات الفصل المسموح بها خلال عمر القاطع عند التشغيل العادى ، وأيضا يتميز بارتفاع عدد المرات الفصل على القصر ، وغالبا يكون العمر الافتراضى لنقاط التلامس فيه من 50 إلى 180 مرة عند الفصل على القصر وحوالي " 10000 " مرة عند الفصل بالتيار المقنن العادى. علما بأن زمن التوصيل يكون تقريبا 75 مللى ثانية ، أما زمن الفصل فيتراوح بين 40 إلى 60 مللى ثانية.

13.10.4النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الـــ SF6

يتميز غاز الـ (SF_6) (سادس فلوريد الكبريت) بعدة ميزات منها أنه:

- غاز خامل وغير قابل للاشتعال ، وغير سام ، ولا لون له ولا رائحة
- عازل جيد جدا للكهرباء حيث تصل كفاءة عزل الغاز المضغوط إلى عشرة أمثال عزل الهواء للكهرباء

- مستقر كيميائيا ، ولا يتحد مع أي مادة أخرى عند درجة حرارة الغرفة ، وبالتالى فإنه يحافظ و يحمى الموصلات من مشاكل الصدأ وغيره التى تحدث أثناء التشغيل كما أنه يحافظ على عمر الموصلات و الماكينات الكهربية .



- هذا الغاز في الضغطِ الجوي الطبيعيِ تكون شدة عزله تساوى 2.5 مرة أفضل من الهواء، وعادة يكون ضغط الغاز المستعمل 3-5 مرة ضغطا جويا وبذلك تكون خواص العازل عشرة مرات أفضل من للهواء.
- عمر هذا الغاز الافتراضي طويل
- وأهم خاصية لهذا الغاز أن الشرارة فيه تؤدى إلى تأين ذرات الـ (SF6) وهذه الأيونات الناتجة تتحد مع ذرات الـ (SF6) الأصلية وينتج عنها (SF6) جديد وبالتالى فالغاز لن يفقد عازليته. وبأسلوب آخر ، نقول أن غاز الـ SF6 يتحلل عند درجات الحرارة العالية الناتجة عن شرارة أو قوس كهربى ، و لكن ذرات الكبريت و الفلوريد تتحد مجددا و تلقائيا مكونة مركبات سادس فلوريد الكبريد من جديد ، وهذا يعنى أن هذا الغاز لا يحتاج إلى إعادة ملأ أو استبدال بشكل دورى على فترات قريبة مثل ما يحدث مع الزيت.

<u>بعض العيوب</u>

1. غاز الـ SF6 هو أثقل من الهواء بحوالي 6 مرات ، ذلك يعني بأنه قَد يتجمع في قنوات الكابلات Cable Ducts أو في أسفل الخزانات . ومع أن الغاز ليس خطر عند استنشاقه لكنه إذا تجمع بكثرة فهناك خطر من الاختناق بسبب قلة الأوكسجين.
2. وعلى الرغم من الفوائد الجمة لغاز ســـادس فلوريد الكبريت فى المحطات الكهربية إلا أنه يعتبر أحد أهم الغازات المسببة للاحتباس الحرارى و أكثرها ضـررا بالبيئة. ففى اتفاقية حماية البيئة بكيوتو، تم إدراج غاز الـ SF6 كواحد من ســتة غازات ينبغى تقليل اســتخدامها. و ربما يكون انبعاث هذا الغاز قليل نسـبيا إذا قورن بباقى الغازات ، إلا أن عمره الطويل فى الغلاف الجوى الذى يتجاوز 3200 ســنة يجعله على رأســها من حيث الخطورة لأنه أكثرهم استدامة فى الغلاف الجوى للأرض.
3. وهناك بعض الاحتياطات التي لابد من مراعاتها عند استخدام الغاز SF_6 في CB's وهى أن غاز الـــ SF_6 لا يكون فعالا إلا عند وقوعه تحت ضــغط عال ، لذلك يتم وضـــع جهاز لقياس الضـــغط على كل Circuit Breaker للتأكد من أن الضغط عند المدى الملائم.

وعموما فإن المعدات الكهربية المملوءة بغاز الـــــ SF6 موجودة بالخدمة منذ أكثر من 40 ســنة وتجربتها في الخدمةَ الفعلية جيدة جداً.

13.10.5 ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6:

1. التشغيل الطبيعى : ضغط الغاز بالمفتاح 7 بار
2. ضغط الإنذار : 6.2 بار
3. ضغط Blocking : 5 بار

- عندما يقل الضغط عن (5) بار فإن الغاز لا يستطيع إخماد الشرارة داخل قاطع الدائرة Circuit Breaker لذلك يصبح قاطع الدائرة مغلقا Blocked أوتوماتيكيا (أي أنه لا يمكن فتحه وذلك لمنع حدوث الشرارة) ويظل هكذا حتى يصل الضغط إلى المدى الآمن مرة أخرى. وغالبا يكون انخفاض الضغط مصاحبا بإعطاء إنذار صوتى.
- عند انخفاض الضغط يتم نقل أنابيب الشحن المملوءة بغاز الــــ SF6 ، والمتاحة في الــ Switch yard ، والتى تحمل غالبا على عربة إلى مكان العطل أو التسرب لتعبئة القاطع بالـــــ SF6 حتى مستوى الضغط المطلوب للتشغيل الآمن .
- هذا النوع من القواطع (مثله مثل أى قاطع آخر) يحتوى على لوحة توضـــع فى أســفله تبين وضـــع المفتاح "متصل أو مفصول" ، وكذلك تبين وضع السوسته هل هى مشحونة أم لا .
- وهو أيضـا مثل كافة القواطع يكون منه نوعين Dead Tank كما فى الصـورة شكل 13–26 ، التى تظهر قاطع SF6 – 500 kV ، ومنه أيضا الــــــ Live Tank الذى ظهر فى أول صورة لمحطة هوائية فى هذا الفصل.



Figure 13-26 SF6 CB

- ويوجد منه أيضا نوعان : خارجى وداخلى . وتركب القواطع الغازية في الخارج في محطات AIS (كما فى الصورة السابقة) ، كما يوجد منه القاطع الداخلى الذى يكون جزءا من الـــ Bay فى محطات الـــــ GIS الداخلية.

ومن الميزات الأخرى للقواطع الغازية (SF6) التى تفسر تفوقها على بقية الأنواع :

- عدم الحاجة إلى ضاغط compressor والاعتماد على تقنية الدفع الذاتى للغازات .
- بســـاطة غرف الفصـــل التى لا تحتاج إلى غرفة إضـــافية على عكس القواطع القديمة التى تعمل بالهواء المضغوط.
- وقت قصير لفصل العطل من 2 إلى 2.5 دورة (cycles) تحت جهد فائق (EHV).
- يسيطر الـ SF6 على الــــــ Arc بسهولة لأن له خواص تبريد ممتازة في درجات الحرارة (1500– 5000 كلفنْ) التي فيها تطفئ الـ Arc .
- قدرة تحمل كهربية تسمح بضمان عمر افتراضى لا يقل عن 25سنة .
- الأمان عند التشغيل
- أصوات منخفضة عند التشغيل .

و أكثر أنواع الـــ CBs استخداما في الوقت الحاضر هما الـ SF6 CBs ، و الــــ Vacuum CBs ولذلك لطول أعمار الـــ Contacts الخاصة بهم بالنسبة لعدد مرات الفصل في ظروف التشغيل الطبيعية أو الـــــ faultsمما يجعلها لا تحتاج إلى الصــــيانة بشـــكل مســـتمر مثل الأنواع الأخرى ولذلك توصـــف هذه الأنواع بأنها " Maintenance free CBs" .

13.10.6ما هو دور جهاز الـــ anti-pumping relay ؟

في حالة الضـغط على زر غلق القاطع يقوم القاطع بتنفيذ الغلق ، لكن ماذا لو كان هناك أمام القاطع short circuit؟ فى هذه الحالة يقوم القاطع بالفصـــل فورا. لكن ماذا لو كان هذا الشـــخص حركة أصـــابعه بطيئة ، ولايزال ضاغطا على زر التوصيل ؟ عندئذ ستكون هناك فرصة لتكرار التوصيل والفصل.

ولتفادي هذه المشـكلة ولضـمان عملية التوصـيل لمرة واحدة في كل عملية ضــغط ، فإن القواطع تزود بجهاز وقاية يسـمى anti–pumping relay يقوم بقطع التغذية السـالبة عن ملف التوصـيل بعد التوصـيل مباشـرة و بذلك نضمن ألا يحدث تلف لموتور الشحن أو سوستة الفصل والتوصيل.

13.10.7ملحوظات من الواقع:

1- فى محولات 220/66 kV يكون قاطع المحول من النوع SF6 من جهة الـ 66 kV أصغر في الحجم من القاطع الموجود فى جهة الـ 220 kV ، وذلك لأن الثلاث فازات تكون موجودة داخل ماسورة واحدة (تسمى فى مصر بولة واحدة) وهو تعريب مصرى لكلمة Pole أو Pool ، ولكن ضغط غاز الـ SF6 يكون أعلي فى قواطع الـ 66 kV بسبب وجود الـ 3-Phases داخل البولة الواحدة .

2- قيمة الـ Short circuit capacity للمفاتيح المستخدمة فى مصر حسب الجهد هي:-

- 40 KA في مفتاح الـ 220 kV
- 31.5 KA في مفتاح الـ 66 kV
- 26.3 KA في مفتاح الـ 11 kV

وأعتقد أنه يجب إعادة النظر فى هذه القيم على ضوء تزايد قدرات التوليد التى دخلت مؤخرا فى الشبكة.

3- معظم قواطع الجهد المتوسط تركب داخل خلايا لوحات التوزيع و تتميز بأنها حرة الحركة حيث يمكن إدخالها وإخراجها عن طريق وسائل عدة مثل عربة التحميل . ويوجد أنواع أخرى نجد فيها القاطع مجهزا بعجل Rolling يساعد فى عملية سحبه وتحريكه بسهولة كما فى الصور شكل 13-27.



قاطع تيار محمول علي عربة





قاطع تيار على عجل قابل للسحب

Figure 13-27 تحريك القواطع

4- وهذه قيم لأهم الضغوط بالمحطات سواء للغاز أو للزيت:

SF6 rated pressure	**7 bar**
Sf6 pressure first alarm	**6.2 bar**
Sf6 pressure second alarm	**5 bar**
Oil rate pressure	**336 bar**
Oil low pressure	**316 bar**
Oil locking pressure	**264 bar**
Oil locking trip	**250 bar**
Disconnectors & Earth switches	
SF6 rate pressure	**4 bar**
Sf6 low pressure first alarm	**3.2bar**
SF6 locking pressure second alarm	**3 bar**

13.10.8توصيف الــــ Circuit Breakers:

يتم توصيف الـــ CB طبقا للعناصر التالية:

1- Rated Voltage

و هى تساوى أكبر قيمة لجهد المنظومة System Voltage فى الظروف الطبيعية . والقيم القياسية هى (مقاسة بالـ kV) :

3.6 – 7.2 – 12 – 17.5 – 24 – 36 – 52 – 72.5 – 100 – 123 – 145 – 170 – 245 – 300 – 362 – 420 – 550 – 800

2- Rated Normal Current

و هى قيمة الـ R.M.S Current التى يمكن أن يتحملها القاطع باستمرار فى الحالات العادية.

According to IEC60059 the standard values of rated normal currents are:

630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 A

3- **Rated Short Circuit Breaking Current (I_{sc})**

و هى أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن يمر بالقاطع لحظة فصله دون حدوث تلف للقاطع وغالبا يكون فى حدود عشرة أمثال التيار المقنن للقاطع. (يسمى أيضا $I_{Breaking}$).

4- **Rated Short Circuit Making Current (I_m)**

ويسمى (I_{making}) ، و هى أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن للقاطع أن يغلق عليه فى وجود Short Circuit بدون أن يحدث له ضرر. عادة تكون قيمته مقارنة بالقيمة فى البند السابق كما يلى: $I_{making} = 2.55\ I_{Breaking}$

5- **Rated short circuit current**

هو أقصي قيمة لتيار القصر يمكن أن تمر في أجهزة القطع وهى مغلقة لمدة ثانية واحدة أو 3 ثوانى بدون حدوث أي تلفيات في القطع.

وهناك مصطلحات هامة أخرى يجب توصيفها مثل Restiking Voltage وتجد تفاصيلها فى الباب السادس (الفصل 28) عند الحديث عن الجهود العابرة بالشبكات ، فيحسن الآن الرجوع إليها.

13.11 الاختبارات التي تتم على قواطع الجهد العالي والمتوسط

الغرض من هذه الاختبارات هو التأكد من مدى تطابق مواصفات القاطع مع أدائه ، والتأكد من مدى صلاحية القاطع لإدخاله إلى الخدمة. و توجد أنواع مختلفة من الفحوصات منها:

13.11.1 الفحوصات العامة للقواطع

1- اختبار سلامة الملامسات **Contacts** العلوية والسفلية للقاطع من أجل التوصيل الجيد داخل غرفة إطفاء الشرارة.
2- التأكد من سرعة الفتح والغلق الميكانيكي للقاطع.
3- سلامة مفتاح حدود الشحن **Charging Limit Switch** .
4- سهولة إدخال وإخراج القاطع .
5- عمل السخان الموجود داخل حجرة القاطع بصورة صحيحة.
6- التأكد من التأريض

الاختبارات التشغيلية Operation Tests

في هذا الفحص يتم التأكد من سلامة مفاتيح التشغيل للقاطع ، حيث يتم التأكد من عمل القاطع بالضغط على مفتاح التشغيل ثم يتم الضغط على مفتاح الفصل ثم يتم التأكد يدويا من عمل سوستة الشحن حيث يتم شحن القاطع يدويا من خلال يد مخصصة لذلك.

فحص الأقفال الميكانيكية Mechanical Interlock

يتم التأكد من عدم إمكانية إدخال وإخراج القاطع وهو في حالة الغلق ، وعدم إمكانية تأريض المغذي والقاطع في موضع الخدمة، إلى آخره من الأقفال **Interlock** المتداخلة الميكانيكية الموجودة بالقاطع لتجنب الوقوع في الخطأ وحدوث الكوارث.

الأقفال الكهربائية Electrical Interlock

يجرى التأكد من عدم إمكانية غلق القاطع جهة الجهد العالي للمحول عندما يكون القاطع فى جهة الجهد المنخفض مؤرضا. أيضا يتم اختبار التشغيل اليدوي **OFF/ON** والتشغيل الكهربائي للقاطع **Local and Remote.** ، واختبار شحن القاطع يدويا وكهربيا.

13.11.2 اختبارات قوة العزل بالقاطع

يجب إجراء فحص قوة العزل على القواطع الكهربائية لمعرفة شدة مقاومة العزل الموجودة بين أقطاب القاطع بعضها مع البعض وبينها وبين الأرضي ، وكلما زادت مقاومة العزل بين الأجزاء الحاملة للفولتية وبين الأجزاء الميتة أي الأجزاء الغير حاملة للفولتية يكون القاطع جيد جدا. وقوة العزل تقاس فى حال كون القاطع فى الوضع **ON** أو فى الوضع **OFF** .

يتم تشغيل القاطع فيحدث تلامس بين الـ **Moving and fixed parts** داخل القاطع ، وباستخدام الميجر يتم قياس قوة العزل بين الأقطاب وبعضها ، وكذلكقوة العزل بين الأقطاب وجسم القاطع.

- قوة العزل بين أقطاب القاطع وجسم القاطع يجب أن تكون أكبر من 500 ميجا أوم (أو القيمة المحددة في الكتالوج)
- قوة العزل بين أقطاب الـ **Phase** الواحد **R-R** مثلا فى حدود 10 كيلو أوم أو أقل أثناء الغلق.
- قوة العزل بين أقطاب القاطع المختلفة يجب أن تكون أكبر من 500 ميجا أوم

تعاد نفس الاختبارات السابقة ولكن مع وضع القاطع فى الوضع **OFF-position** وهنا يجب أن تعطى كل الاختبارات السابقة قيما أكبر من 500 ميجا أوم.

والشكل 13-28 يظهر شكل توصيلات الاختبارات.

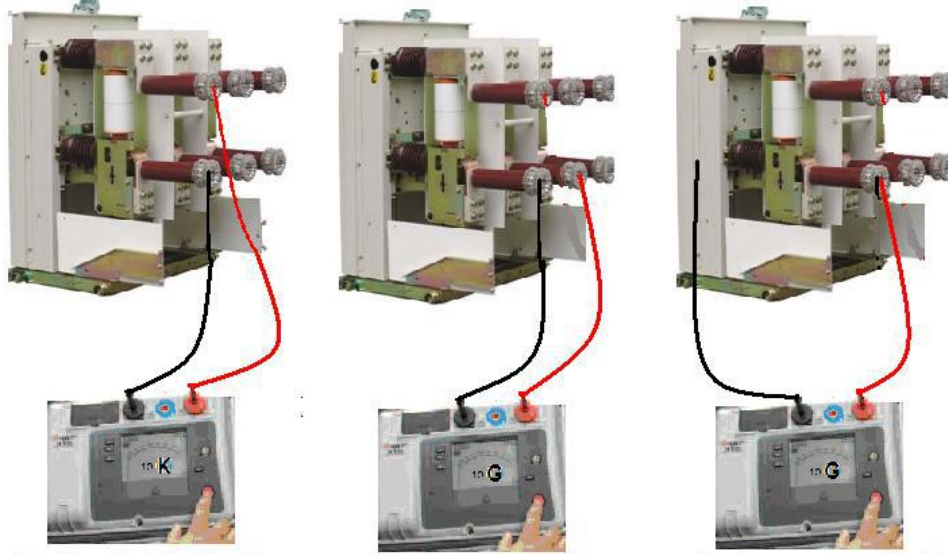


Figure 13-28 اختبارات قوة العزل

13.11.3 فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة

يستخدم جهاز ما يكرو–أوم ميتر لقياس مقاومة الـ **Contacts** الخاصة بالقاطع ويتم قياس مقاومة كل **phase** على حدة ، و تتراوح قيمة مقاومة نقاط التلامس للقاطع عند جهد **11** ك ف حول 12–60 **μΩ** أما قواطع الـ **33kV** فتتراوح حول **μΩ** **(25–100)** .

وكلما كانت قيمة مقاومة الأقطاب قليلة كلما قل قيمة هبوط الجهد وتحسن مواصفات القاطع ، أما إذا كانت مقاومة تلامس الأقطاب عالية (أي فيها رخاوة) فإنها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأقطاب أثناء مرور التيار الكهربائي فيها ويؤدي إلى تأكل الأقطاب وربما يؤدي في النهاية إلى انفجار الأقطاب .

الشكل 13–29 يمثل جهاز المايكرو–أوميتر، وتقاس المقاومة عن طريق إمرار تيار مستمر في أقطاب القاطع مقداره **100** أمبير وقياس مقدار الجهد على الأقطاب بواسطة فولتميتر موجود أيضا داخل الجهاز ثم بتقسيم الجهد على التيار يتم حساب المقاومة ويظهر قيمة مقاومة تماسك الأقطاب على شاشة الجهاز.

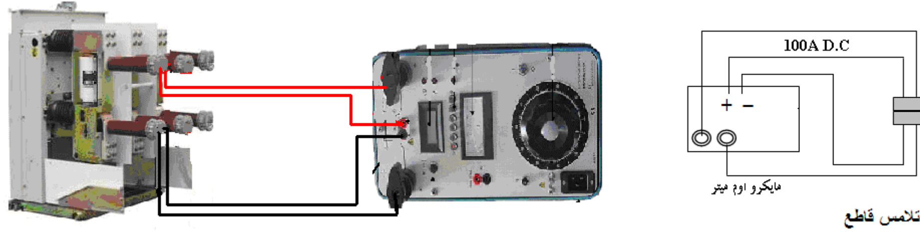


Figure 13-29 قياس مقاومة التلامس فى القاطع

13.11.4 اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل:

يتم هذا الاختبار على ملف الفصل وملف التوصيل . والهدف من هذا الاختبار هومعرفة زمن الفصل ، وأيضا معرفة أقل جهد يمكن أن يعمل عنده ملف الفصل وملف التوصيل بحيث لو حدث وانخفض جهد البطاريات عن جهد التشغيل العادي بنسبة معينة نكون قد ضمنا عمل ملف الفصل لفصل القاطع عند حدوث أي عطل .
ويهدف هذا الاختبار أيضا للتأكد من أن المفاتيح تعمل ميكانيكيا بطريقة صحيحة وأن الفازات الثلاثة تعمل معا في نفس اللحظة .

ويتم هذا الاختبار كالتالي:

- بالنسبة للمفاتيح الجديدة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح عند ما يكون الجهد على أطرافه مساويا لـ 80% من من جهد الـ **D.C** المقنن ، ويقاس زمن الفصل أيضا عند **60%** من جهد الـ **D.C**
- بالنسبة للمفاتيح القديمة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح فقط عند **100 %** من جهد الـ **D.C** و يلزم تساوي الزمن للأوجه الثلاثة.

13.11.5 اختبارات تسلسل التشغيل

كما نعلم فإن القاطع معرض للفصل والتوصيل تحت الحمل وأثناء العطل بصورة متتابعة وأحيانا فى من قصير للغاية ، وبالتالى فنقاط التماس معرضة للسخونة والتلف في حالة التشغيل والفصل بدون وجود نظام يحكم تلك العملية ، ولذلك يتم اختبار تحمل القواطع وفقا لتسلل معين . وفيما يلى واحد من أنظمة الاختبارات هذه :

O – 0.3s – CO – 3min – CO

حيث

- حرف الـ O تعنى فتح القاطع Open
- حرف الـ C تعنى اغلاق القاطع Close
- أما وجود الرمزين مع بعض CO فتعنى عملية غلق ثم فتح مباشرة

- أما زمن الثلاث دقائق فتعنى زمن إعادة شحن سوسته القاطع
- أما الـ 0.3 sec فتعنى زمن إعادة التشغيل

وبالتالى يمكن أن نقرأ التسلسل السابق كما يلى: فتح القاطع ثم بعد زمن تأخير قدره 0.3 sec يتم عمل غلق وفتح متتابعة ثم يترك 3 دقائق ثم عملية غلق وفتح متتابعة أخرى.

الجزء الثانى من الفصل الثالث عشر

منطقة الـجهد العالي فى محطات الـــــ GIS

يحتوي هذا النوع من المحطات على كافة المعدات الموجودة فى المحطات الهوائية لكن كافة عناصر المحطة مثل القواطع (Circuit Breakers) والقضبان (Bus-Bars) والعوازل (Isolators) ومحول التيار (CT) ومحول الجهد (VT) تكون مغمورة بمادة الـ (SF6) داخل أوعية معدنية (Metal Housing). مع ملاحظة أن المعدات الداخلية لا تتلامس مع هذه الأنابيب فهى معزولة تماما عنها.

والشكل 13-30 يمثل صورة لمنطقة الجهد العالى فى محطات الـ GIS . لاحظ فى الصورة ظهور نفس الرموز التى استخدمت فى شرح الـ SLD للمحطات الهوائية. وقد سبق الإشارة لبعض من سمات غاز الـ SF6 عند الحديث عن SF6- CB ويفضل مراجعتها الآن.



Figure 13-30 GIS

13.12المهمات فى محطات الـــ GIS

تتكون منطقة الجهد العالي فى هذه المحطات (H.V switch gear) من: High Voltage Bus Bar ، تتصل عليه مجموعات من الـ Bays وهى :

1- Incoming Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الدخول للمحطة من

الشبكة العامة.

2- Outgoing Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الخروج إلى محولات المحطة أو إلى الشبكة العامة.

والشكل 13-31 يمثل هذه المكونات.

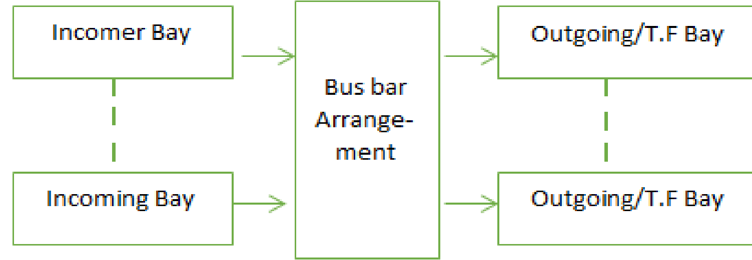


Figure 13-31 GIS outline

13.12.1مكونات الـــ Bay

داخل الـ Bay توجد مجموعة معدات الـ Switchgear التى يدخل عليها Incomming /outgoing feeders قبل أن تتصل بالـ BB ، وتشتمل على قاطع CB ، و محول تيار CT ، ومحول جهد VT ومفتاح تأريض ES وسكينة DS تماما كما فى دوائر المحطات الهوائية ، لكن مع فرق فى الحجم والشكل والذى يبدو فى شكل 13-32 التى تمثل Bay واحد . حيث تدخل عليه كابلات الدخول من أقصى يمين الصورة (يمكن أن تدخل أيضا الخطوط الهوائية كما فى الشكل 13-35 الذى سيأتى لاحقا) ويمر على المعدات التى ذكرناها وتنتهى على قضبان التوزيع.

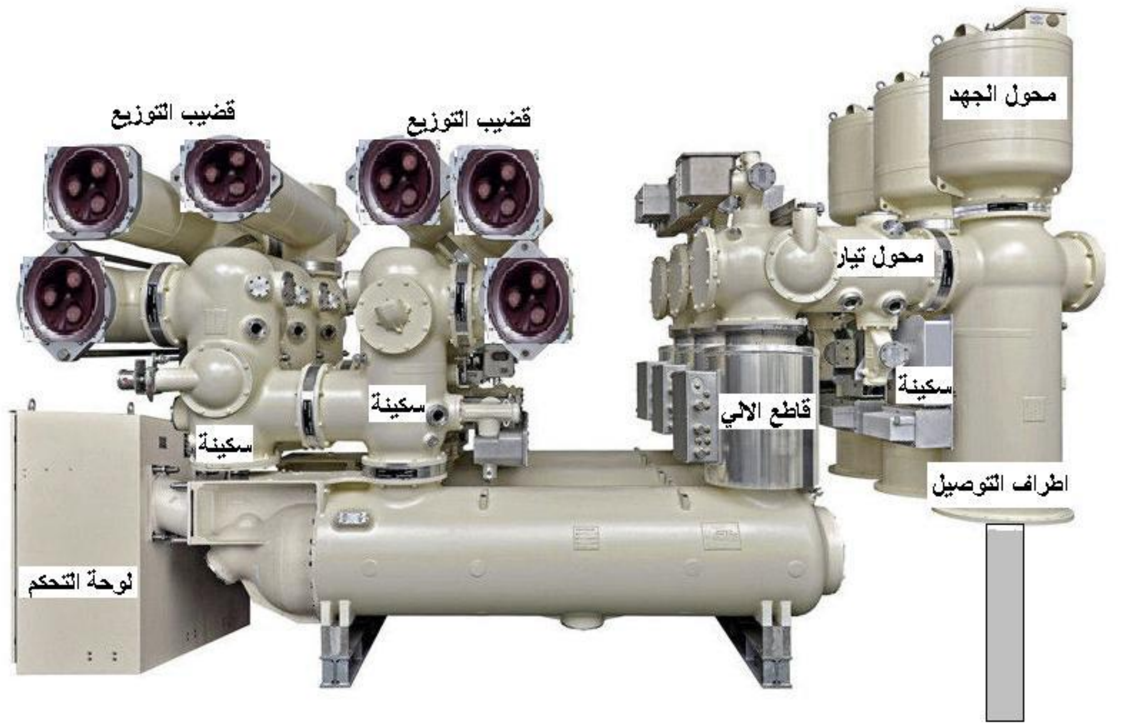
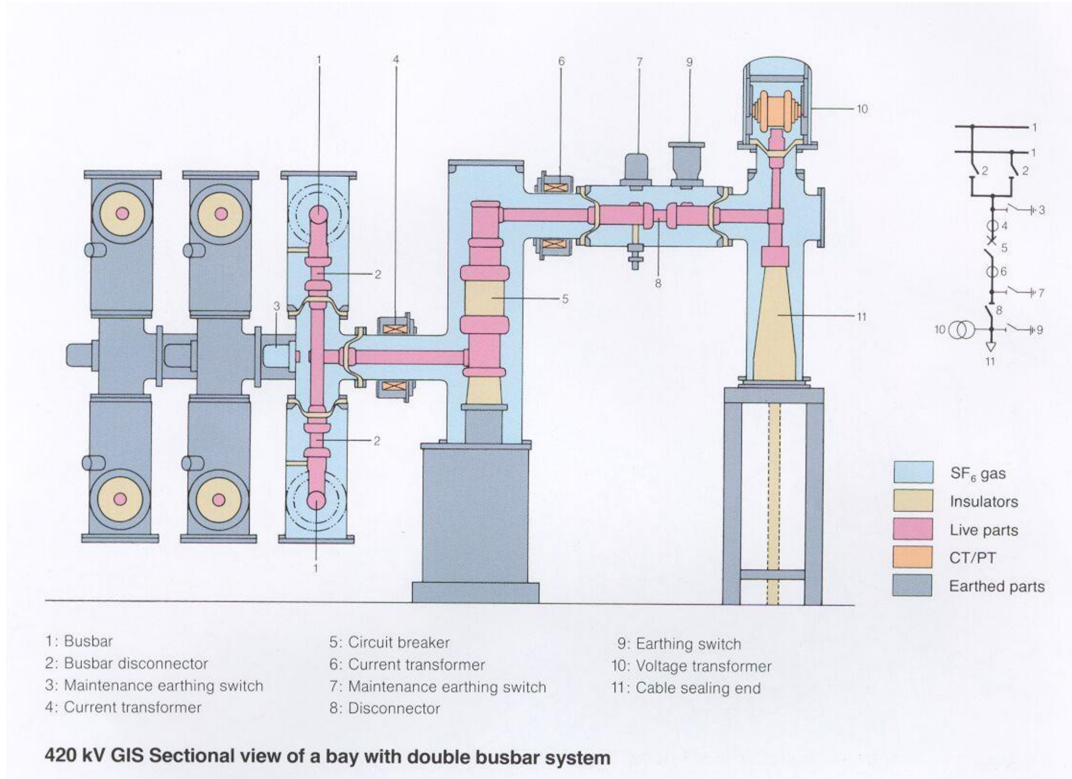


Figure 13-32 GIS Bay

والشكل 13–33 يمثل تفصيل ما بداخل هذه المواسير.



420 kV GIS Sectional view of a bay with double busbar system

Figure 13-33

ويراعى فى تصنيع وحدات الـ CT and VT داخل هذه المواسير أن يتم عمل نوع من التحجيب shielding لهذه العناصر منعا لظهور تيارات حثية Induced currents تؤثر فى دقة قراءاتها.

والشكل 13-34 يبين مخطط Plan لعنبر الـ HV Switchgear فى المحطات الغازية جهد 66 ك ف .

وواضح من المخطط أن لدينا 3 خطوط دخول/ خروج وهى التى تخترق جدار المحطة ثم لدينا عدد 12 Bays وهذه قد تكون متصلة بمحولات المحطة من خلال كابلات أرضية وغالبا سيكون منها واحدة أو اثنين احتياطى.

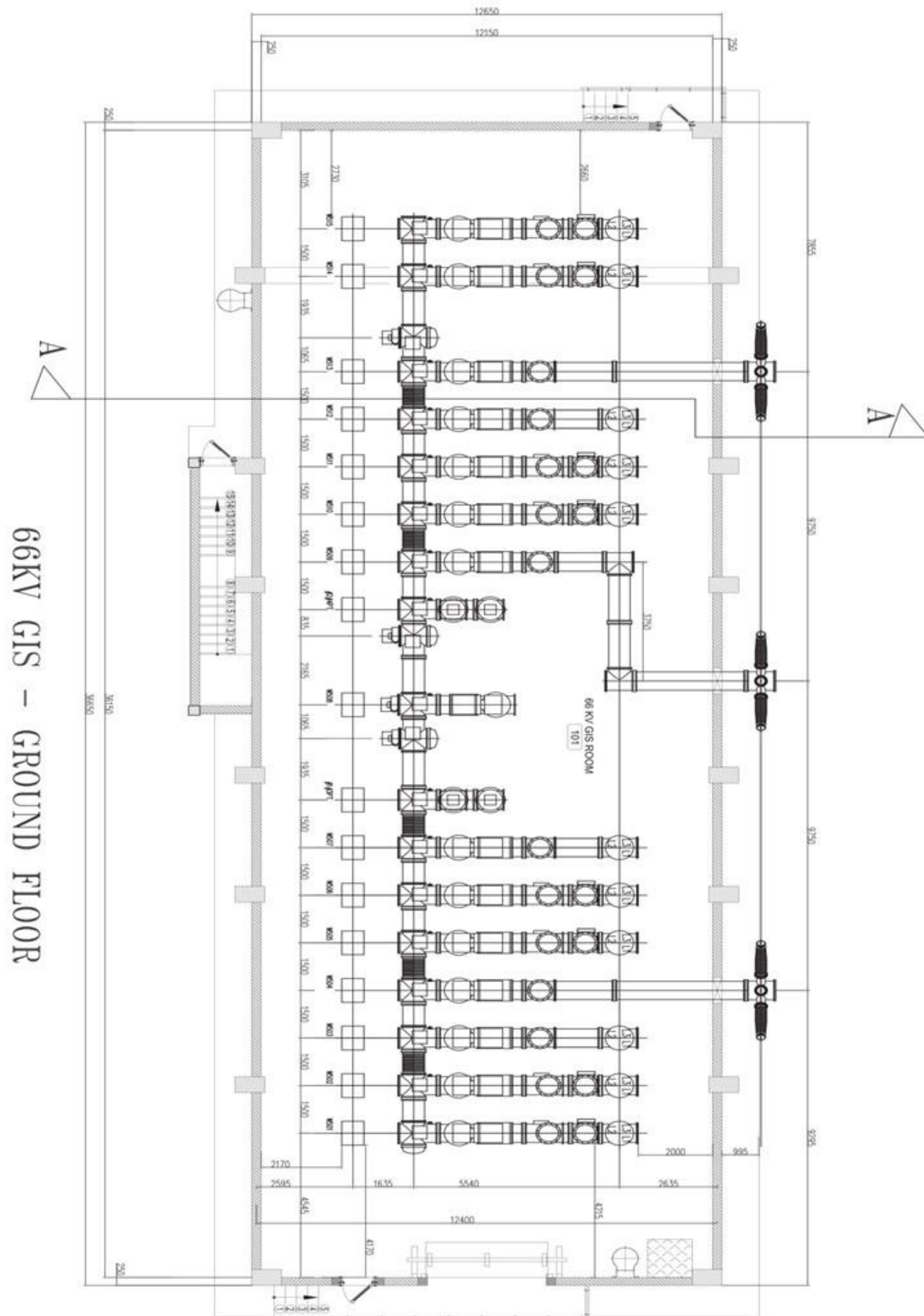


Figure 13-34 GIS Plan

13.12.2 الدخول إلى محطة GIS

يكون دخول وخروج المغذيات إلى المحطة

- إما من خلال خطوط هوائية (شكل 13–35) من خلال وحدة تسمى Outdoor Termination Module

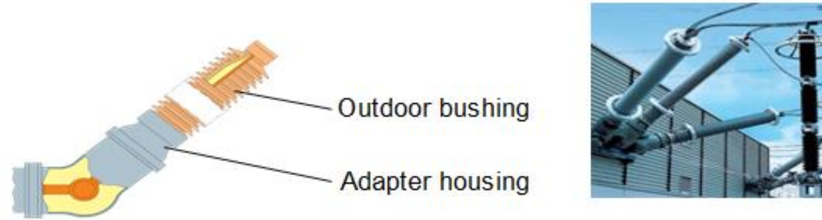


Figure 13-35 Outdoor Termination Module

- أو من خلال كابلات أرضية (شكل 13–37) من خلال وحدة تسمى Cable Termination Module

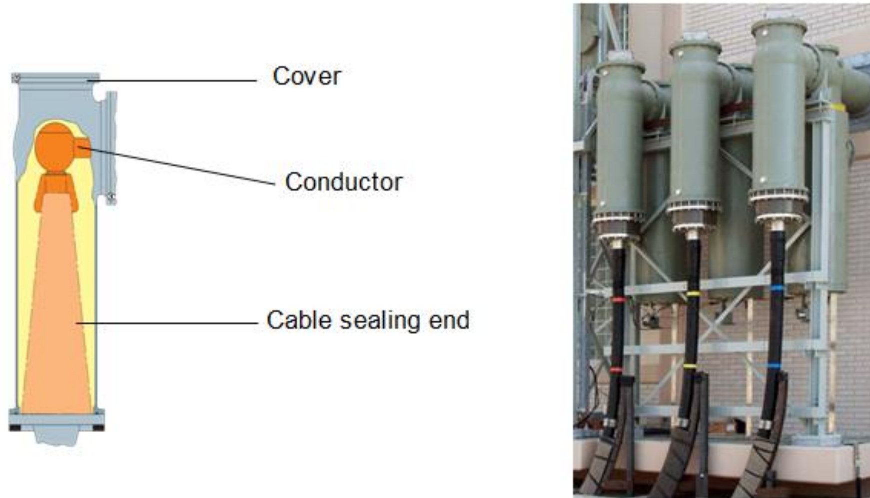


Figure 13-37 Cable Termination Module

أما المحولات فتتصل بالنظام من خلال Transformer Termination Module كما فى شكل 13−38

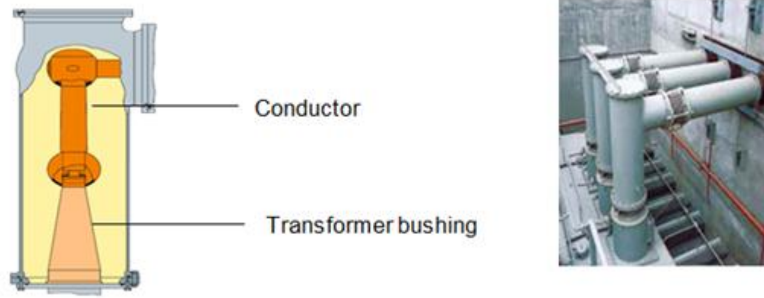


Figure 13-38 Transformer Termination Module

13.12.3 الحماية من الصواعق فى محطات الـــ GIS

يتم تثبيت عناصر أكسيد الزنك فى مانعات الصواعق و التى تغمر فى غاز الـ SF6 بواسطة اسطوانات عازلة بداخل مواسير الـ GIS. و لأن موصلات الـ GIS تتواجد بداخل وعاء معدنى مؤرّض فإن المدخل الوحيد لنبضات الصواعق يكون من خلال اتصال الـ GIS بباقى النظام الكهربى. فإذا كان التوصيل عن طريق الكابلات فلا مجال أن تتعرض المعدات للصواعق البرقية ، ولذا فإننا نهتم بأمر الصواعق فقط فى حالة الـ SF6-to-Air Bushing. علما بأن مانعات الصواعق المعزولة بالهواء والتى تركب بالتوازى مع الـ SF6-to-Air Bushing توفر حماية كافية للـ GIS من الصواعق وبسعر أقل من مانعات الصواعق المعزولة بالـ SF6.

القسم الثاني بالمحطة:

المحولات

تعتبر المحولات هي العنصر الأساسي في المحطة فالغرض الأساسي من محطة التحويل هو رفع أو خفض الجهد بواسطة هذه المحولات . و تقع المحولات غالبا في فناء منفصل عن فناء منطقة الجهد العالي كما في الشكل 13–39 و ليس هناك مهمات كثيرة في هذا الفناء لأن معظم المهمات الخاصة بالمحول تقع فى منطقة الجهد العالي السابقة .



Figure 13-39 Transformers

(يفضل الرجوع لكتابى المرجع فى محولات القوى الكهربية) لمزيد من التفصيل فى هذا العنصر الذى يمثل عصب المحطة).

القسم الثالث بالمحطة :

عنبرالجهد المتوسط MV Switchgear

بعد خروج كابلات الجهد المتوسط من المحولات فإنها تتجه إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط حيث يتم ربطها على BB الجهد المتوسط من خلال قواطع CBs داخل خلايا كما في الشكل 13-40 . و تشتمل كل خلية من هذه الخلايا بالإضافة إلى القاطع ومنطقة دخول الكابل على محول تيار/ جهد و سكينة عزل و أجهزة الحماية و القياس.

وهذا العنبر مكون من مجموعة من الخلايا (شكل 13-40) ، و عدد هذه الخلايا يساوى عدد كابلات الجهد المتوسط الخارجة من المحطة (خلايا الخروج) بالإضافة إلى عدد المحولات و التي تتصل بخلايا الدخول لهذا العنبر. ويضاف إلى ما سبق عدد آخر من الخلايا ، وهى خلايا القياس التى تحتوى على معدات قياس الجهد والتيار والقدرة بأنواعها ، وهناك خلايا لتوصيل مكثفات تحسين معامل القدرة ، وهذا كله بالإضافة بالطبع إلى خلايا الربط بين أجزاء اللوحة والخلايا الاحتياطية.

و كما ذكرنا فإن أحد أهداف محطات التحويل هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة إلى عدد كبير من المغذيات منخفضة الجهد والقدرة ، لتعطى تغذية مساحة جغرافية أكبر وهذ الخلايا كلها متجمعة على الـ LV BB الخاص بالمحطة.



Figure 13-40 موزع جهد متوسط

تفاصيل أكثر عن هذه الخلايا تجدها فى الباب الرابع فى الجزء الخاص بموزعات الجهد المتوسط.

خاتمة الفصل الثالث عشر

مقارنة المحطات الهوائية والغازية

13.13 **المحطات الهوائية** (AIS):

المحطات الهوائية كما ذكرنا سابقا هي المحطات التي تستخدم الهواء كعازل بين الـ Phases المختلفة و كذلك أيضا بين الـ Phase و الأرضي ، ويستخدم الحديد المجلفن فى الإنشاءات لدعم المعدات والعوازل والخطوط الداخلة والخارجة للمحطة. والشكل 13–41 يجمع عناصر المحطة الهوائية فى رسم توضيحى.

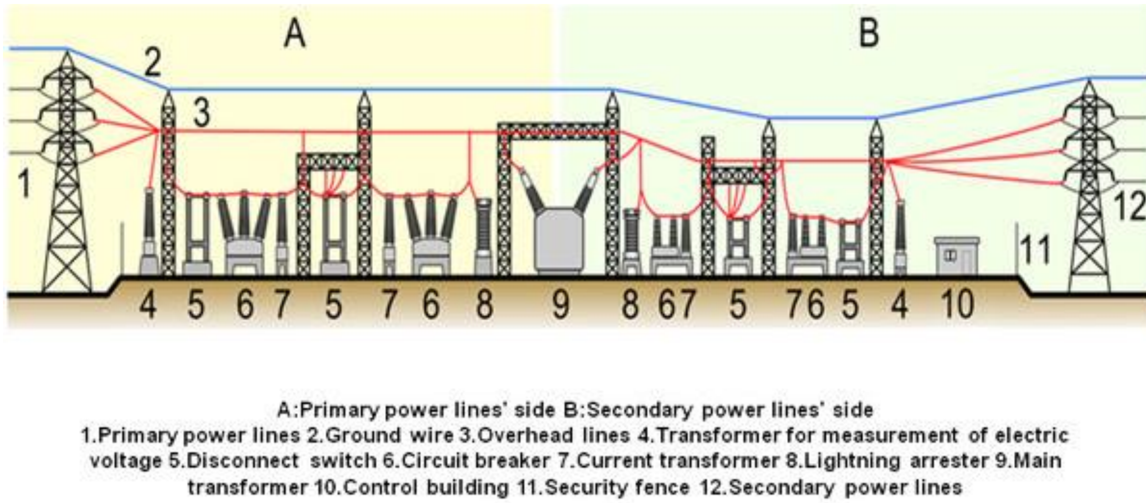


Figure 13-41 AIS

يوجد نوعان من المحطات الهوائية:

1- محطات خارجية **Outdoor:** و هي المحطات التي تكون مكشوفة في الهواء غير مغطاة.

2- محطات داخلية **Indoor:** تكون داخل مبنى مغطى و يستخدم هذا النوع من المحطات الهوائية في الأماكن شديدة التلوث و الأماكن الغير مستقرة مناخيا.

وبالتالى فليس معنى أنها هوائية أنها مبنية فى الهواء الطلق بل يمكن أن تبنى داخل مبنى وتظل تسمى هوائية طالما أن العزل بين أجزاءها هو الهواء كما فى الصورة شكل 13–42.



Figure 13-42 indoor AIS

كما أن المحطة قد تكون غازية لكنها فى الهواء الطلق بدون مبنى كما فى الصورة شكل 13–43



Figure 13-43 Outdoor GIS

13.14 محطات الـ GIS

من أكبر التحديات الرئيسية اليوم في عالم نقل الطاقة الكهربية هو تحقيق مستويات عالية من الجهد في شبكات النقل حتى لو كانت داخل المناطق الحضارية. وهذا يتطلب أن تشغل المعدات مساحات صغيرة ، ويتطلب ذلك أيضا انخفاض مستوى الضجيج والانبعاثات الكهرومغناطيسية.

والمحطات المعزولة بالغاز(GIS) لا مثيل لها عندما يتعلق الأمر بمساحة الاشغال والاعتمادية والكفاءة والسلامة ، فتصميم محطة الـGIS يكون أصغر بنسبة تصل إلى أكثر من 80% من إجمالى مساحة المحطات التقليدية كما أنها تكون أقل حاجة للصيانة .

يعتبر هذا النظام من أفضل الأنظمة في الشبكة من حيث التشغيل والصيانة وهو موجود بالمحطات ذات السعات العالية وكذلك أكثر محطات التوليد.

13.15 المقارنة بين المحطات الهوائية والمحطات الغازية

13.15.1ميزات المحطات الهوائية:

- أعمال البناء المطلوبة لهذا النوع أقل نسبيا من محطات GIS وتكلفة تركيب الـ switchgear أقل.

- عمل توسعات فى هذا النوع من المحطات أسهل.
- الوقت اللازم لبناء المحطة أقل.
- جميع المعدات يمكن رؤيتها وبالتالى فاكتشاف الأعطال يكون أسهل.

13.15.2عيوب المحطة الهوائية :

- تبنى على مساحات واسعة مقارنة بمحطات الـ (GIS). فمن المعروف أن أقصى جهد يتحمله الهواء هو 30 kV/cm فى الضغط الجوى العادى ، وإذا زاد الجهد عن هذه القيمة فإن عزل الهواء ينهار و يصبح موصلا. وبالتالى فإن المحطات الهوائية تحتاج إلى مساحات كبيرة حتى يمكن توفير قيمة العزل المطلوبة.
- ونتيجة للنقطة السابقة فإن بناء محطة هوائية أصبح معقدا في التخطيط و يتطلب الكثير من الوقت في التنفيذ مما يزيد من التكلفة الثابتة ، كما أن احتياجها للصيانة الدورية يجعل تكلفة التشغيل أيضا مرتفعة.
- محطات الـ AIS تعتبر أقل فى الاعتمادية من محطات GIS بسبب أنها معرضة أكثر للصواعق ، وبسبب أن الهواء ردئ كعازل ، فتغير درجة حرارة الهواء و مستوى الرطوبة و المطر وملوثات الهواء عوامل رئيسية تتسبب في انهيار العزل عند جهد أقل من الجهد الذى تمت عليه الحسابات .

13.15.3ميزات محطات الـــ GIS:

- هذه المحطات آمنة وتتم عزل الأجزاء المكهربة باستخدام أغلفة معدنية مؤرضة ومن ثم فهناك ثقة فى عزل كل الأجزاء التى يمر بها تيار كهربى .
- والمحطات المعزولة بهذا الغاز تزيل المجال الكهربي بالكامل لأن الأغلفة المعدنية بهذه المحطات تمنع ظهور المجال الكهربى خارجها ، وهذه فائدة حقيقية للقائمين بأعمال التركيبات Installers وموظفي التشغيل و الصيانة ، ومن يعِيشون على مقربة من تلك المحطات.
- تكلفة التشغيل قليلة.
- معدلات ووقت الصيانة أقل ، فهى تتطلب صيانة كل أربع سنوات بينما AIS تتطلب صيانة كل سنة أو سنتين ، كما أن مدة الصيانة نفسها فى محطات الـ AIS تكون أكبر ، فصيانة الـ AIS breaker وحده تأخذ حوالي 4-8 ساعات فى كل مرة (للقاطع فقط).
- المحطة غير مقيدة بالموقع فمن الممكن أن تبنى المحطات فى الأماكن المفتوحة أو المغلقة فوق أو تحت الأرض بجانب البحار و المحيطات أو فوق المرتفعات أو فى مناطق الجليد أو

الممطرة. أي أن استخدام هذا النوع من المحطات لا يتأثر بالظروف المناخية أو الموقع نظرا لأنها محكمة الغلق ولا يتأثر العزل بمثل هذه الظروف.

- سهلة التركيب (تستغرق وقتا أقل بنسبة 30 % من المحطات الهوائية).
- التوفير فى مساحة المحطة ، فمثلا عند جهد 400 كيلو فولت تكون مساحة محطة الـ AIS تقريبا تساوى = 236*199م =46765 م^2 ، أما فى محطات الـ (GIS) فتكون المساحة تقريبا تساوى 12*43م = 522 م^2 فقط.
- والفرق بين النوعين من حيث المساحة المطلوبة للمحطة واضح من خلال الشكل 13-44:

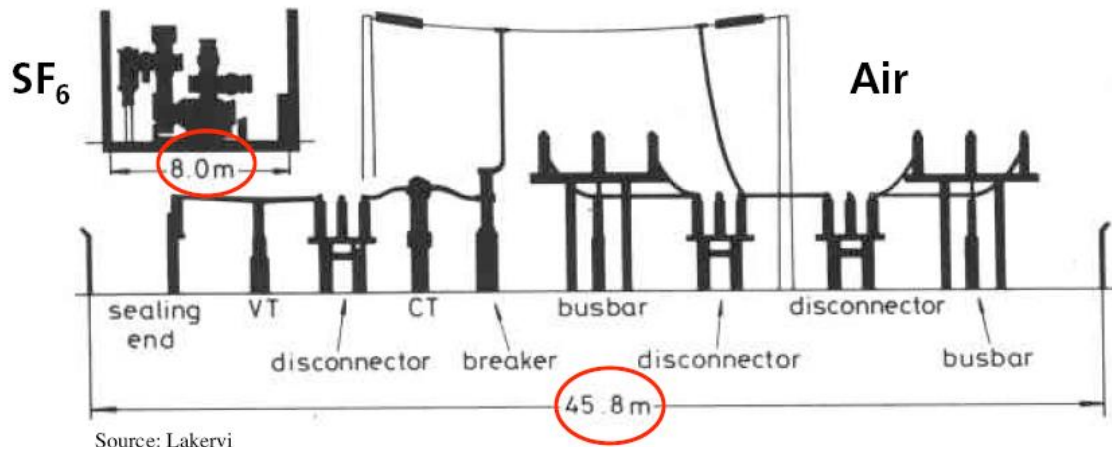


Figure 13-44 AIS vs GIS

13.15.4 عيوب محطات الـ (GIS):

- التكلفة العالية مقارنة بالمحطات التقليدية
- في حالات حدوث الخلل تكون الأضرار على نطاق واسع
- تحديد الخلل و اكتشافه و تصليحه يستغرق وقتا كبيرا .
- ضغط الغاز يجب أن يكون مراقبا فى جميع مكونات المحطة فأي انخفاض في ضغط الغاز قد يؤدي إلى حدوث خلل قد يكون مدمرا
- غاز SF6 يسبب تآكل الأوزون و يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري

13.15.5 مقارنة بين اقتصاديات المحطات

تكلفة المعدات فى محطات الـ GIS أعلى من نظيراتها فى المحطات التقليدية التى تستخدم عزل الهواء كما ذكرنا. و ترجع هذه الزيادة فى التكاليف إلى عدة عوامل لعل أبرزها وجود إطار معدنى. و مع ذلك فإن محطات العزل بالغاز هى أقل فى التكلفة من حيث التركيب. كما تمتلك محطات الغاز ميزة هامة تتمثل فى انخفاض تكلفة تنمية أو تأهيل الموقع. و هذه الميزة تزداد اهميتها كلما ازداد جهد المحطة لأنه فى المحطات التقليدية يكون كلمة "جهد أعلى" تعنى "مساحة أكبر " و بالتالى تكاليف أكثر لتأهيل هذه المساحة.

عند الجهود العالية كان متوقعا من محطات الـ GIS أن تكون أقل كلفة من التقليدية ، ولكن ما حدث أنه قد تم خفض تكلفة محطات الهواء بصورة كبيرة عن طريق التقدم التقنى و الصناعى (و خصوصا فى القواطع) و ذلك خلال الثلاثين سنة الماضية ، بينما لم تظهر أسعار مكونات الـ GIS أى انخفاض كبير. لذلك و مع أن الـ GIS ظلت التكنولوجيا المفضلة لفترة طويلة بفضل اعتماديتها العالية و قلة و ربما انعدام احتياجها للصيانة إلا أنها تظل الأعلى تكلفة و يتم تنفيذها فى حالات خاصة عندما تكون المساحة المتوفرة أقل من أن يقام عليها محطة تحويل تقليدية. وعموما فإن تكلفة محطات الـ GIS أكثر من الــ AIS بحوالي 10 % إلى 40% .

فى وقتنا الحالى فإننا نشهد تناقصا فى كلفة الـ GIS نتيجة للتكامل بين أجزاء المحطات. كما أن ظهور نظم التحكم الرقمى و تزايد استخدامها فى محطات النقل أدى إلى طفرة ملحوظة فى محولات الجهد والتيار خفضت كثيرا من كلفتها. كما أن تكلفة التركيب و تأهيل الموقع تنخفض تدريجيا فى محطات الـ GIS.

وحاليا هناك توجه جديد يسمى "تقنيات السويتش المختلطة" أو "محطات عزل الغاز الهجينة" و التى تستخدم قواطع و مفاتيح و محولات تيار و جهد معزولة بغاز الـ SF6 موصولة بباقى المعدات فى المحطة عن طريق موصلات معزولة بالهواء. هذا التطور الحديث ينبئ بحدوث طفرة فى أسعار الـ GIS مع التضحية باستخدام مساحات أكبر للمحطة.

14

ترتيبات قضبان التوزيع

BUS BARS

دور الـ BB فى المحطات أنه يسهل عملية توزيع الطاقة بين دوائر الدخول والخروج ، وهو عنصر هام وخطير بالمحطة لأن أى عطل عليه قد يتسبب فى خروج المحطة بالكامل. فوظيفة الـ BB هى تجميع الطاقة الكهربية القادمة من دوائر الدخول (المصدر) ثم توزيعها على دوائر الخروج (الأحمال والمحولات والخطوط الخارجة من المحطة) .

14.1 تصنيع القضبان العمومية

يوجد نوعان أساسيان مستخدمان فى تصنيع القضبان هما:

1- القضبان الصلبة Rigid bus .
2- القضبان المرنة Strain bus.

وفى الغالب تستخدم القضبان الصلبة rigid في حالة الجهد الكهربي المتوسط والمنخفض ، وتكون مصنوعة من الألومنيوم أو النحاس على هيئة قضبان أو أنابيب تربط بين أجزاء المحطة المختلفة كما فى الشكل 14-1.



Figure 14-1 Rigid Bus Bar

أما فى حالة الجهد العالي فتستخدم القضبان المرنة strain المصنوعة من أسلاك الألومنيوم المجدولة والمدعمة ACSR ، أو من النحاس ويتم تثبيتها على عوازل Strain type insulators وذلك للربط بين مكونات المحطة كما فى الصورة شكل 14-2.



Figure 14-2 Strain Bus bar

وأحيانا تكون الـ BB معزولة بغاز الـ SF6 داخل مواسير كما فى الشكل 14-3.



Figure 14-3

SF6 gas insulating bus-duct (GIB)

14.1.1 مميزات وعيوب الـــ (Rigid Bus) :

أهم الميزات:

3- أقل استخداما للحديد وأسهل في التصميم المدني.
4- أسهل في تنظيف العوازل .
5- قل ارتفاعا ويمكن فصله للصيانة.
6- أفضل من حيث رؤية الأجهزة و المعدات.

أما أهم العيوب فهى:

- استخدام العديد من العوازل والدعامات وبالتالى الحاجة إلى صيانة هذه العوازل وتنظيفها .
- يتطلب مساحة أكبر مقارنة بالـ **Strain bus**
- أعلى تكلفة مقارنة بـ **(strain bus)**.

وتتوقف قيمة المسافات بين القضبان حسب جهد التشغيل كما فى الجدول 14-1

Table 14-1

الجهد	مسافة بين الفاز وارضى بملى ميتر	مسافة بين الفاز والفاز بملى ميتر
6.6	139.7	177.8
11	177.8	228.6
22	279.4	330.2
33	381	431.8
66	685.8	787.4
110	863.6	990.6
132	1066.8	1219.2
220	1778	2057.4

14.2 ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS

يمكن تقسيم الـ BBs من حيث الـتركيب إلى عدة أنظمة:

1-Single BB
2-Double BB
3-Ring System

وكل نظام منهم يندرج تحته عدة أنظمة فرعية:

ويوجد داخل كل Substation نوعان من الـ BBs : أحدهما جهة الجهد العالي ، والآخر جهة الجهد المتوسط.

والهدف من الـ BB الخاص بالجهد العالي كما ذكرنا هو ربط دوائر الدخول/ الخروج من/إلى الشبكة العامة من جهة ، وربطها مع محولات القدرة من جهة أخرى ، بحيث يمكن للمحطة أن تستقبل قدرة أو تنقل قدرة من / إلى الشبكة.

أما الـ BB الخاص بالجهد المتوسط فوظيفته ربط الكابلات الخارجة من محولات القدرة الرئيسية بالمحطة بمجموعة كابلات الجهد المتوسط المتجهة خارج المحطة لتغذية أحمال المستهلكين .

والسبب فى تنوع أشكال الـ BB هو المزيد من تسهيل عملية اختيار النوع المناسب للمحطة من حيث التشغيل والتكلفة.

ويتم التمييز بين الأنواع المختلفة حسب حجم توافر الميزات التالية فى نظام الـ BB :

1) بساطة النظام.
2) سهولة الصيانة للمعدات المختلفة.
3) التقليل من مدد انقطاع الخدمة.
4) توفر إمكانية التوسع مع نمو الطلب.
5) توفر إمكانية إضافة دوائر جديدة للمحطة دون الحاجة لفصل الدوائر الموجودة بالخدمة أثناء عملية التركيب.

وبالطبع هذه الميزات جميعا قد يتوافر بعضها أو كلها فى نظام ولا يتوافر فى الآخر ، وطبيعى أيضا أن التكلفة تزيد بزيادة الميزات ، ومن هنا ستكون هناك موائمة ما ، عند تصميم أى محطة للوصول لأفضل الاختيارات .

14.3 النظام الأول: SINGLE BUS BAR:

يستخدم في المحطات ذات القدرات المنخفضة والفولتيات المتوسطة ويوجد منه نوعان :

14.3.1 محطات تحويل أحادية القضبان

وهذا النوع هو أبسط أنواع الـ BB وأرخصها ، ويندر أن تجده فى محطة تحويل مهمة ، ولكن قد تجده فى محطات التحويل الصغيرة داخل شبكات التوزيع كما فى الشكل 14-4. وبالطبع يعيبه أنه فى حالة حدوث عطل بدائرة الدخول أو على اى جزء بين الـ BB فستخرج كل الدوائر المتصلة على هذا الـ BB.

وأيضا إذا أردت أن تضيف دائرة خروج جديدة على هذا الـ BB أو حتى عمل صيانة فى خلية قديمة موجودة فيلزم أولا أن تفصل وتعزل الـ BB كله حتى تنتهى من عمل التركيبات الجديدة .

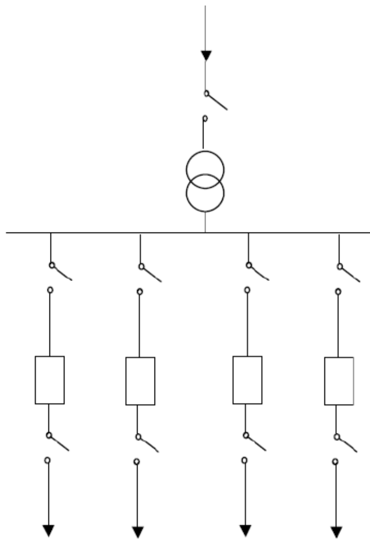


Figure 14-4 Single BB

14.3.2 محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان

لتقليل المشاكل السابقة يمكن استخدام sectionalized Single BB كما فى الشكل 14-5 ، وهذا النوع له اعتمادية أعلى حيث أن كل جزء يتصل بمغذى مستقل ، فعند حدوث عطل على جزء ما فإننا نفقد فقط نصف أو ثلث الأحمال (حسب عدد الـ Sections) وليس كل الأحمال كما فى النوع الأول .

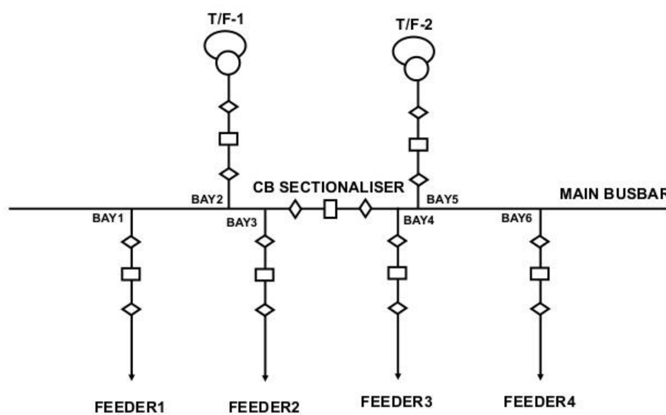


Figure 14-5 Sectionalized single BB

والصورة التالية شكل 14–6 تمثل نموذجا لـ Single BB with 3-Sections فى محطة جهد 132 ك ف.



Figure 14-6 Sectionalized single BB

كما يمكن تغذية الجزئين من مغذى واحد فى حالة حدوث عطل فى أحد المغذيين بشرط أن يتحمل المغذى الرئيسى لهذا الجزء الحمل بالكامل ، فإذا كان لا يمكنه أن يتحمل كل الحمل فيمكن أيضا توصيل الجزئين ولكن مع فصل بعض الأحمال غير المهمة حتى يصبح المغذى قادرا على تحمل بقية الأحمال.
وبالطبع فهذا النوع والنوع الذى سبقه أيضا لا تجدهما فى حالة المحطات المهمة.

ويعيب هذا النظام كما هو الحال بالنسبة لنظام single bus system ، أن صيانة المعدات (الـ CB مثلا) في أي Bay لا يمكن أن تتم من دون انقطاع التغذية أو المحولات المتصلة بهذا الـ Bay.

14.4 النظام الثاني: نظام القضبان المزدوجة DOUBLE BUS BAR:

يستخدم هذا النظام في المحطات ذات القدرات العالية وأنظمة الجهد العالي ، وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربية بطريقة تضمن استمرارية أفضل للتغذية .

ويوجد منه عدة أنواع :

1- Double BB with Single CB

2- Double BB with Double CB

3- Double BB with One and Half CB

4- Double BB (Main and Transfer)

ولكل شكل منهم ميزاته وعيوبه ، لكن الميزة المشتركة فيهم جميعا هى أنه إذا حدث عطل على أي من الـ Two-BBs أو إذا تم فصل أحدهما لإضافة أو عزل دائرة جديدة فلن يتسبب ذلك فى أى مشكلة بسبب وجود الـ BB الثاني الذى يمكن نقل جميع الدوائر إليه باستخدام رابط القضبان Bus Coupler, BC كما سنرى. لكن عند حدوث مشكلة على دوائر الدخول أو دوائر الخروج سيكون هناك فرق بين الأنواع الأربعة فى درجة الاعتمادية كما سنرى.

14.4.1 النوع الأول من القضبان المزدوجة : Double BB with Single CB

فى هذا النوع (شكل 14-7) وعند الحاجة مثلا لإضافة دائرة جديدة على M-1 يمكن نقل كافة دوائر الدخول والخروج إلى M-2 بالخطوات التالية :

- غلق سكاكين الـ Bus Coupler, BC
- غلق الـ CB الخاص بالـ BC (الآن أصبح الـ 2-BBs لهما نفس الجهد)
- غلق سكاكين الدوائر الموصلة على M-2 (لاحظ أن فرق الجهد على هذه السكاكين يساوى صفر ومن ثم يمكن فتحها وغلقها بأمان)
- فتح سكاكين الدوائر على M-1
- فتح الـ CB الخاص بالـ BC
- فتح سكاكين الـ BC

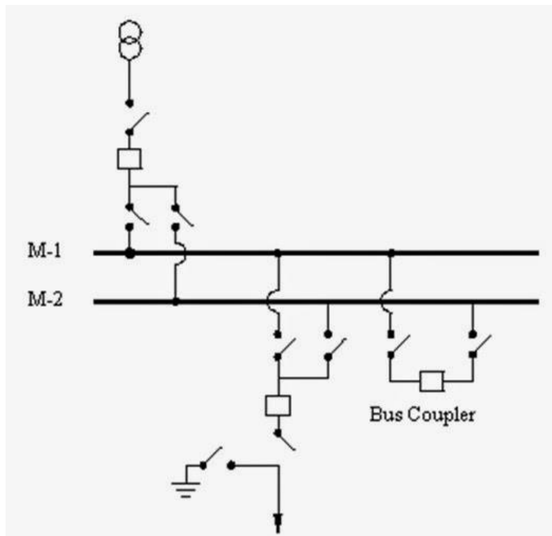


Figure 14-7 Double BB with Single CB

الآن أصبحت جميع دوائر الدخول والخروج موصلة على الـ BB الثانى ويصبح الأول جاهزا لاى صيانة أو إضافة تركيبات دون التأثير على الخدمة.

ويعيب هذا النوع عدم إمكانية عمل صيانة على الـ CB الخاص بدائرة خروج دون فصل الأحمال على هذه الدائرة وتأثرها ، والوضع سيكون أسوأ إذا كانت الصيانة على الـ CB الخاص بدائرة الدخول إذا كانت هناك دائرة واحدة أو كانت الدائرة الأخرى لا تتحمل كافة الأحمال ، بمعنى أنه مفيد فقط فى صيانة الـ BB أو عند إضافة أحمال .

ويعيبه أيضا استخدام ثلاث سكاكين فصل (Isolators) لكل دائرة فضلا عن استخدام قاطع إضافى وهو الخاص بالـ Bus Coupler.

لاحظ الفرق بين الـ Bus Section فى النظام الأول والـ Bus Coupler فى النظام الثاني:

- فالأول يسمى مجزئ القضبان Bus Section ، وهو عبارة عن قاطع يقوم بتجزئة الـ BB إلى جزأين مما يعطي مرونة في استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء أعمال الصيانة على أحد الأجزاء كما رأينا .

- أما الثاني فيسمى دامج القضبان Bus Coupler هو أيضا قاطع لكنه يقوم بعملية ربط أكثر من BB مع بعض لكي يضمن استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء الصيانة على أحد القضبان أو لسهولة التوزيع الأحمال.

14.4.2 النوع الثاني Double BB with Double CB

فى هذه التوصيلة (شكل 14–8) تكون دائما جميع الـ CBs مغلقة فى الظروف الطبيعية.

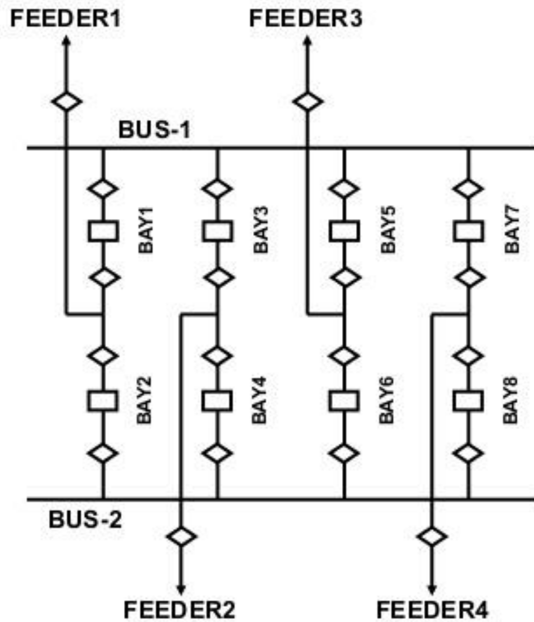


Figure 14-8 Double BB with Double CB

وبالإضافة للميزات التى ذكرت فى النوع السابق فلدينا هنا ميزة إضافية وهى أنه فى حالة حدوث مشكلة فى الـ CB المتصل بالـ BB الأول الخاص بالدائرة سواء (الدخول أو الخروج) فيمكن هنا مباشرة استخدام الـ CB الثاني ، وهذه ميزة هامة على اعتبار أن مشاكل الـ CB متكررة.

وهذا بالطبع مكلف جدا ويندر أن تجده فى محطات التحويل العادية (ولكنه يستخدم في محطات التوليد ومحطات التحويل ذات الجهد العالي والفائق نظرا لأهمية هذه المحطات) ويعيب هذا النوع بالإضافة إلى التكلفة والمساحة الكبيرتين أنه يحتاج لفصل 2-CBs لكل عطل وهذا يضاعف احتمالية حدوث Breaker Failure .

14.4.3 النوع الثالث: Double BB with One and Half CB

هو حل وسط بين النظامين السابقين (شكل 14–9) فلدينا هنا في الشكل 2-BB وبينهما تركب ثلاثة قواطع لكل دائرتين اي لدينا قاطع و نصف لكل دائرة و هذا يعني نوعا من التوفير في عدد القواطع. لكن نظام الوقاية سيكون نسبيا أكثر تعقيدا من الأنظمة السابقة . ولأهمية هذا النظام وكثرة وجوده بالمحطات سيتم شرحه هنا بصورة مفصلة.

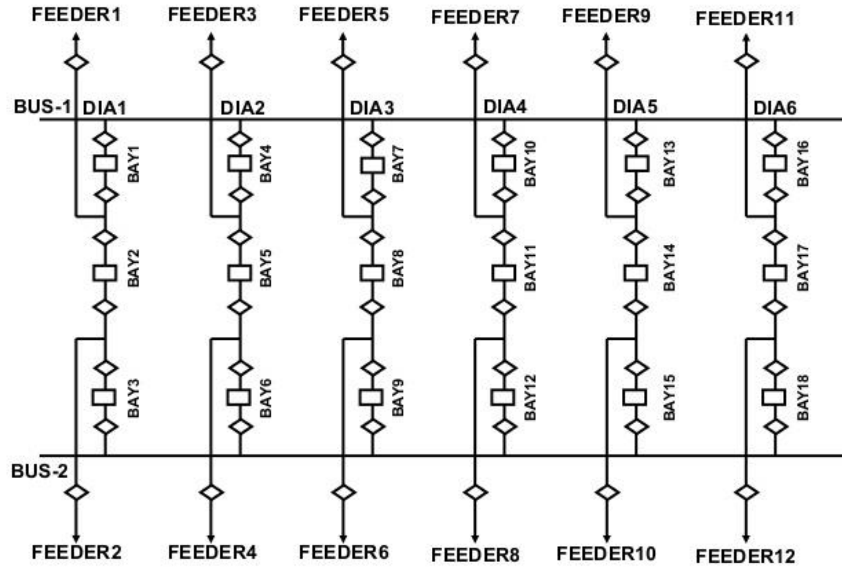


Figure 14-9 One and Half BB

الأصل أن الـ 3-CBs الموجودة على كل دائرتين كلهم مغلقين فى الظروف الطبيعية (تسمى المجموعة الواحدة Bay كما فى الشكل 14–9) ، وبالتالى فالـ BBs الاثنان يعملان أيضا فى الظروف الطبيعية ، ولذا يعتبر كل واحد منهما Main-BB ، ولا فرق بينهما ويسمى الـ CB الموجود فى الوسط بالـ Tie-Breaker .

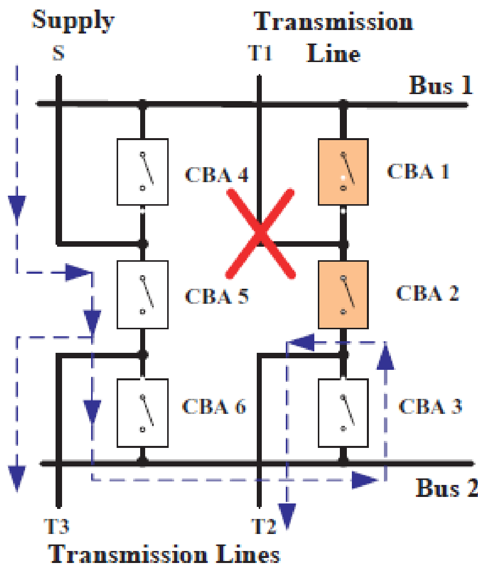


Figure 14-10

وعند حدوث عطل على أى خط فإن كلا الـ CBs المتصلان بالخط المعطل يفصلان (يمين و شمال الدائرة) و بالتالى تعزل الدائرة المعطلة تماما دون تأثير على أي دائرة من الدوائر الأخرى بالمحطة ، فمثلا لو كان هناك عطل على Feeder-8 فى الشكل السابق فسيتم عزله بفتح الـCBs الموجودة فى Bay11 and Bay12 .

ولو كان هناك عطل على الخط T1 فى الشكل 14–10 فسيتم عزله بفتح CBA 1 and CBA 2 ، مع ملاحظة أن بقية الخطوط لا تتأثر بفتح هذين القاطعين ، فالخط T3 سيتم تغذية من المصدر S من خلال CBA 5 بينما الخط

T2 سيتم تغذيته من المصدر S عبر القواطع 5 ثم 6 ثم 3 كما فى الشكل 14-10.

لاحظ أيضا أنه يمكن صيانة أى واحد من الـ CBs الثلاثة الموجودة فى أى Bay بالمحطة بدون فصل أى من الأحمال ، كما فى المثال الموضح بالشكل 14-11 حيث افترضنا خروج CBA 5 ، ومع ذلك فمازال المصدر S قادرا على تغذية الخطوط الثلاثة ، فالخط T1 يمكن تغذيته من خلال القاطع 4 ثم القاطع 1 ، بينما الخط T2 يمكن تغذيته من خلال القاطع رقم 4 ثم 1 ثم 2 ، وأخيرا فالخط رقم T3 يمكن تغذيته من خلال رقم 4 ثم 1 ثم 2 ثم 3 ثم 6 ومنه للخط. وهذا يعنى أن النظام لم يتأثر بخروج القاطع CBA 5.

لكن هذا يستلزم أن تكون مواصفات القاطع رقم 4 مثلا ملائمة لكي يتحمل تيار كل المغذيات .

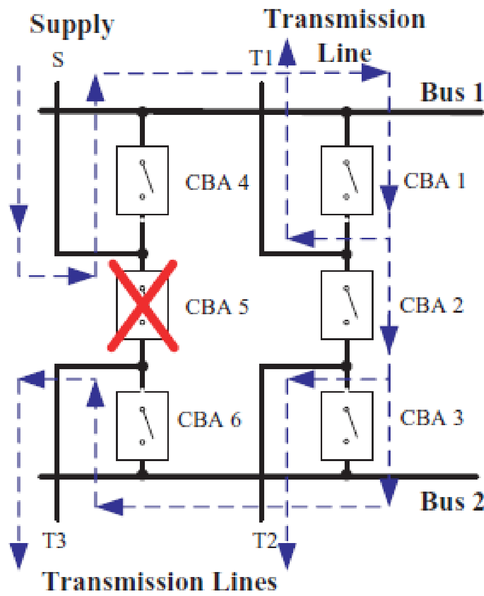


Figure 14-11

يمكن أيضا فى هذا النظام فصل أي من الـ -Two BBs دون فصل أي دائرة ، كما فى المثال الموضح بالشكل 14-12، فرغم فتح الـ Bus 1 إلا أن الخطوط الثلاثة لاتزال مغاذة بالمسارات الموضحة بالشكل. وبالطبع يمكن بعد عزل الـ BB أن نضيف عليه أى دوائر جديدة ، وهذا يعنى أن النظام يتميز بالقدرة على إضافة أى دوائر جديدة (سواء كانت دوائر خروج أو دخول) دون تأثير على بقية الدوائر الموجودة بالخدمة وهذا يساعد على إستقرار الشبكة وتحقيق استمرارية التشغيل .

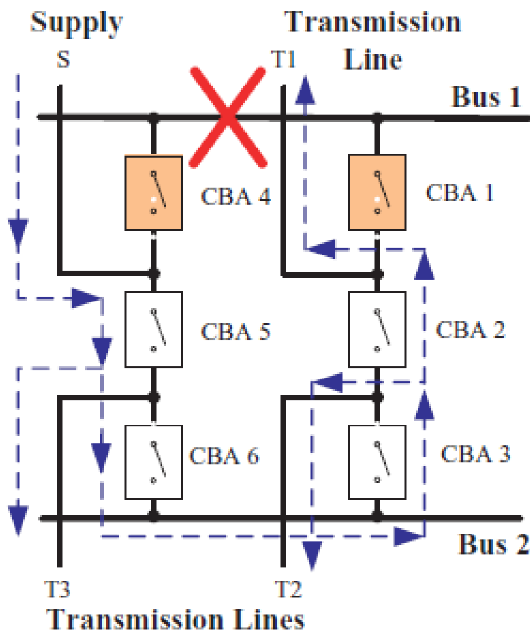


Figure 14-12

والشكل 14–13 يمثل نموذجا لنظام الـ BB فى محطة شبرا الخيمة حيث أربع دوائر دخول وثمانية دوائر خروج.

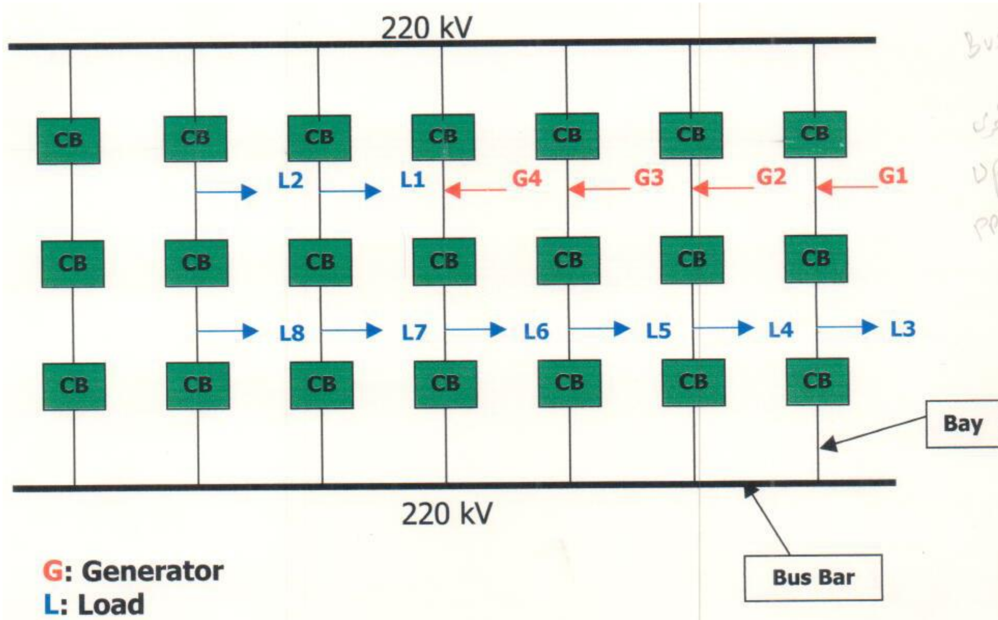


Figure 14-13 Seven Bays in a generation station

14.4.4 النوع الرابع Main and Transfer

هذا نوع آخر من التركيبات التي بها 2-BBs ، والأصل هنا (شكل 14–14) أن تدخل جميع الدوائر الدخول و الخروج على الـ BB (Main) ، فإذا أردنا عمل صيانة لـ CB الخاص بأى دائرة فى الشكل فإننا نقوم بغلق دائرة الـ Bus Coupler أولا وذلك بإغلاق السكاكين على كلا جانبي قاطع (Bus Tie) bus coupler ثم اغلاق القاطع نفسه وذلك من أجل أن يصبح الجهد على كلا الـ BBs متساويا ، ثم نقوم بغلق السكينة الثالثة المتصلة بالـ Transfer Bus للدائرة المراد صيانتها ثم نقوم بعزل الـ CB الخاص بالدائرة ومن ثم فتح السكاكين الخاصة به.

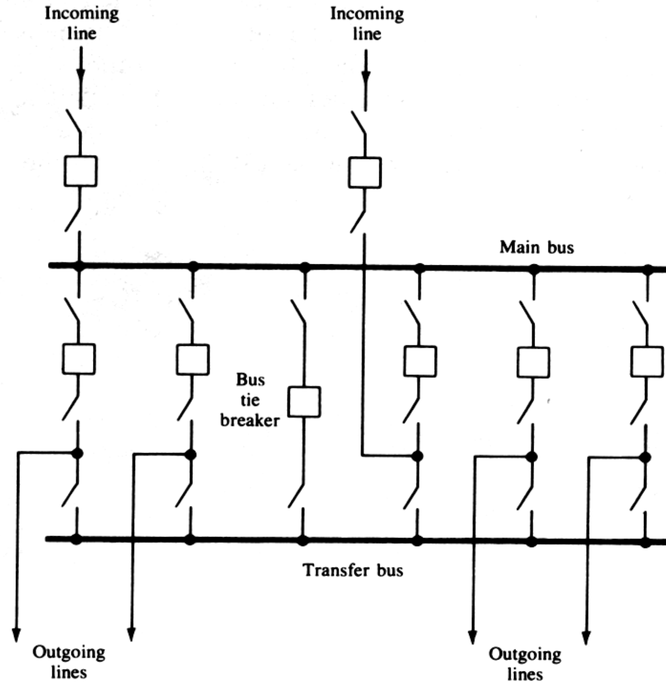


Figure 14-14-14 Main and Transfer BB

و يصبح الآن الخط متصلا بالـ Transfer Bus من خلال السكينة العلوية و في هذه الحالة يكون الـ CB الخاص بالـ BC هو نفسه المختص بحمايته أثناء عملية الصيانة وفى هذه الحالة يصبح النظام مشابها تماما لنظام Double BB with Single CB الذى ذكر فى النوع الأول.

في هذا النوع أيضا يمكن إجراء صيانة لـ (Line Circuit Breaker) دون حدوث تأثير على الـ (Supply) وبهذا يتميز عن (Double Bus-Bar with Single Breaker).

كما يتميز بإمكانية نقل الأحمال من الـ (Main Bus) إلى الـ (Transfer Bus) في حالة حدوث عطل أو إجراء صيانة لـ (Main Bus) ، ولكن يعيب هذه التوصيلة أنه في حالة خروج Main BB للصيانة فإن بقية الدوائر يمكن نقلها إلى الـ BB الأخرى لكن بدون وقاية بمعنى أنه لا يوجد CB على الدائرة و إنما فقط Disconnecting Switch .

لاحظ أن كلا النظامين (Main and Transfer & Double BB with Single CB) كلاهما يصنف في الظروف الطبيعية على أنه single BB لأن الـ Bus Coupler, BC يكون دائما مفتوحا و هذا يجعل الاعتمادية في كلا النظامين تشبه الاعتمادية في نظام الـ Single-BB .

14.5 النظام الثالث : الـ RING SYSTEM أو MESH-SYSTEM

هذه التوصيلة تتميز باعتمادية عالية كما في الشكل 14−15 ، ويتكون من عدة مفاتيح كهربية مربوطة مع بعضها البعض على التوالي ، و تربط عدة دوائر كهربية وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربية في حالات الصيانة على الدوائر الكهربية في المحطة وبالتالى استمرارية التغذية للأحمال الكهربية. وفى هذا النظام يكون عدد الـــ (Circuits) مساويا لعدد القواطع (Circuit Breakers) الموجودة في الشبكة. ولا يعتمد على وجود -Main Bus) .Bar)

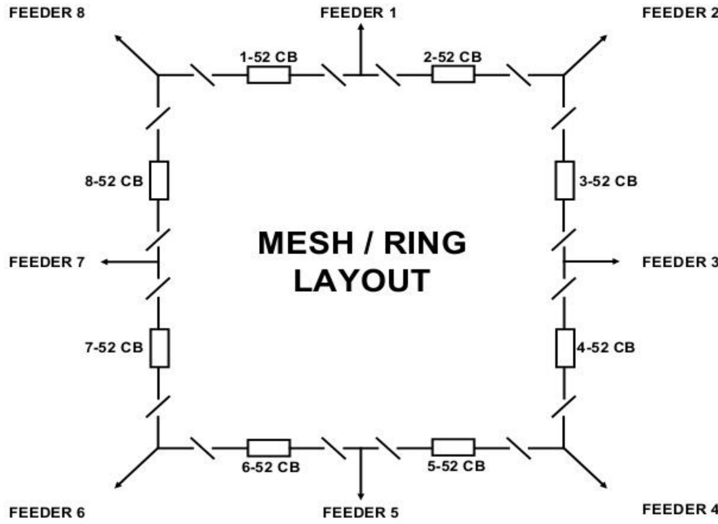


Figure 14-15 Ring System

ويمكن هنا عمل صيانة لاي CB بتحويل اتجاه Power flow إلى الجهة الأخرى دون الحاجة لفصل الدائرة ، و تكلفته تقترب من تكلفة نظام الـ One and Half ، لكن الفرق أن الأخير يفضل استخدامه إذا كان عدد الدوائر كبيرا ، لأن وضعها عندئذ فى Mesh System سيكون معقدا من عدة نواحي منها تنسيق الوقاية مثلا بينما في حالة One and Half ستكون لكل دائرة عدد 1.5 من الـ CBs لكنها منفصلة عن بقية الدوائر فى الشبكة.

لاحظ في Ring System أن أي عطل على دائرة سيتسبب في فصل 2-CBs و فصل الدائرة دون تأثير على بقية الدوائر .

ويعيبه أن نظام الحماية معقد لأنه يحتاج لفصل اثنين من القواطع (Circuit Breakers) لعزل الخط الذي حدث له عطل (Fault).

كما أنه يحتاج إلى محول جهد (Voltage Transformer) لكل دائرة لأنه يعتمد على الوقاية الاتجاهية Directional OC Protection ، وذلك بسبب احتمالية تغير اتجاه التيار من وقت لآخر.

يعيب هذا النظام أيضا أن مرونته للتوسع مستقبلا ضعيفة جدا ، كما أنه عند الصيانة أو لأى سبب آخر لفتح الدائرة يصبح النظام مقسوما لجزئين مفتوحين وأى عطل جديد على أى جزء منهما سيتسبب فى خروج كافة محولات هذا الجزء. بمعنى آخر أن اعتمادية النظام أثناء الصيانة ضعيفة على عكس منظومة الـ One and Half والتى تظل كل Bay فيها مستقلة بذاتها سواء فى التشغيل العادى أو أثناء الصيانة.

14.6 مقارنات بين الأنواع المختلفة

اختيار نوع القضبان لأي محطة تحويل يعتمد على أهمية المحطة وموقعها وكيفية التوسع في المستقبل . وهناك عناصر أخرى للمقارنة منها:

1- الأسعار :

Table 14-2

Configuration	Relative Cost Comparison
Single Breaker-Single Bus	100%
Main-Transfer Bus	140%
Ring Bus	125%
Breaker and Half	145%
Double Breaker-Double Bus	190%

Reference: IEEE 605-2008

2- الاعتمادية

Table 14-3

λ = Annual Fail Rate

r = Annual Outage Time

U = Average Outage Time

Configuration	λ (/yr)	r (min)	U (min/yr)
a	0.0489	72.15	3.53
b	0.0453	71.95	3.26
c	0.00301	184.56	0.56
d	0.00567	124.216	0.70
e	0.0174	81.88	1.42

a. Single bus
b. Sectionalized single bus
c. Breaker-and-a-half
d. Double breaker-double bus
e. Ring bus

15

تأريض محطات التحويل

يهدف تأريض المعدات الكهربائية إلى وقاية العاملين من الصدمات الكهربائية الناتجة من ارتفاع الجهد على جسم المعدات المعدني المكشوف والمعرض للمس (جهد اللمس). وكذلك يهدف إلى الوقاية من الصدمات التى تنشأ من الجهد الذى يظهر على سطح الأرض بين قدمى شخص بالمحطة (جهد الخطوة) ، كما يعمل على زيادة فعالية أداء أجهزة القطع والحماية في حالة وجود تيار عطل أرضي في هذه المعدات ، فتشعر بالعطل وتفصله بصورة أسرع .



Figure 15-1 تأريض تسليح الكابل

وتنقسم نظم التأريض إلى:

- تأريض نقطة التعادل Neutral earthed
- تأريض وقائى للجهد المنخفض (راجع كتاب المرجع فى التركيبات والتصميمات الكهربية للمؤلف)
- تأريض وقائى للجهد العالي حيث يتم تأريض جميع الأجزاء المعدنية Frames الخاصة بالسويتشجير والمحولات وحتى أغلفة الكابلات Cable sheath كما يظهر ذلك فى الصورة شكل 15-1، وأيضا مواسير الكابلات الموجودة بالمحطة. حيث يوجد دائما أرضى عام تتصل به جميع معدات المحطة. وهو موضوع هذا الفصل.

15.1 فكرة الأرضى

والفكرة الأساسية أن تيار العطل إن لم يجد مسار معدنيا لكى يعود من خلاله إلى مصدره فإنه يعود من خلال الأرض كـ Return Path ، وبالتالى يكمل دائرته بالوصول لنقطة تعادل المصدر المنشأ له.

و القيمة المسموح بها لأرضى المحطات الفرعية (الجهد العالى) تتراوح بين 0.5 إلى 1 أوم. بينما تصل القيمة إلى 5 أوم فى محطات التوزيع (الجهد المتوسط). والجدول 15-1 يعطى قيما لمقاومة التأريض فى الأماكن المختلفة.

Table 15-1 قيم مقاومة التأريض فى الأماكن المختلفة

Particulars	Permissible values
Power Stations	0.5 Ohms
EHT Substations	1.0 Ohms
33KV Stations	2.0 Ohms
D/T centers	5.0 Ohms
Tower foot resistance	10.0 Ohms

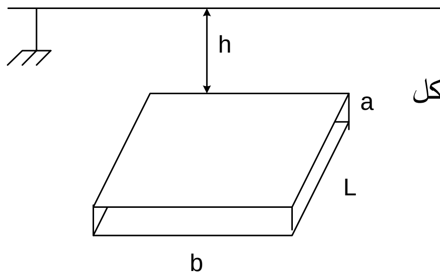
لاحظ أنه لو كانت مقاومة الأرضى مرتفعة لظهر جهد على سطح الأرض مرتفع جدا Ground Potentioal Rise يقدر بقيمة تساوى قيمة تيار العطل مضروبا فى مقاومة الأرض ، ولذا نحتاج لتقليل هذا الجهد من خلال شبكة الأرضى ذات المقاومة المنخفضة جدا كما سنرى.

15.1.1 أشكال التأريض

هناك طرق متعددة لعمل نظام التأريض حسب مستوى الجهد وخطورة تيار القصر كما ذكرنا. ففى الجهد المنخفض قد يكون كافيا استخدام إلكترود تأريض واحد فى حديقة المبنى مثلا لتحقيق مستوى الأمان وذلك بتوصيله للوحة العمومية ومنها إلى بارات التأريض باللوحات الفرعية ومنها إلى النقاط المراد تأريضها. وفى هذه الحالة ، إذا كان إلكترود التأريض على شكل ماسورة اسطوانية مثلا قطرها d وطولها L فإن مقاومة الأرضى حينئذ تحسب من المعادلة التالية:

$$R = \frac{\rho}{2\,\pi\,L} \quad \ln\frac{8L}{d}$$

وفى الجهود المتوسطة تستخدم أحيانا شريحة أفقية لها سمك a وطولها L وعرضها b ، ومدفونة أفقيا على عمق h كما فى الشكل ، وفى هذه الحالة تكون مقاومة الأرضى تساوى:



$$R=\frac{\rho}{4\,\pi\,L}\left[\ln\frac{8L^2}{ah}+\frac{a^2-\pi\,a\,b}{2(a+b)^2}-1+\frac{h}{L}+\frac{h^2}{4L^2}\right]$$

ويمكن إهمال سمك الشريحة وحساب مقاومة الأرضي R لقطب عبارة عن لوح معدني مساحته A من العلاقة التقريبية التالية (المواصفات القياسية IEEE-80-1986)

$$R=\frac{\rho}{2A}\sqrt{\left(\frac{\pi}{2A}\right)}$$

15.2 التأريض فى محطات الجهد العالي

أما فى محطات الجهد العالي فالأمر أعقد وأصعب من ذلك ، والسبب الرئيسي فى ذلك له علاقة بمسار تيار العطل ، فإذا كان مسار رجوع تيار العطل يمر من خلال الأرض وليس من خلال Cable sheath مثلا فستكون لدينا مشكلة تتعلق بتوزيع الجهد على سطح الأرض الناتج من هذا عطل والذى يسمى Ground Potentioal Rise.

فعندما نقول أن مقاومة نظام الأرضى فى محطة ما تساوى 1Ω مثلا فهذا يعنى أن المقاومة الكهربية من نقطة تلامس أى سطح معدنى بالمحطة وحتى نصل إلى نقطة الـ Remote earth – والتى تمثلها الكتلة المنصهرة بمركز الأرض – تساوى واحد أوم. هذه المقاومة الكلية تحسب من المعادلات كما فى الجزء السابق ، وبالتالى فعند مرور تيار العطل I_F يساوى مثلا 10 kA خلال إلكترود مقاومته 8 أوم فإنه سيتسبب فى ظهور جهد تراكمى متزايد على سطح الأرض Ground Potential Rise, GPR ، يبدأ بقيمة جهد تساوى 80 kV عند الجسم المؤرض ويساوى (I_F x R_E) كما فى الشكل 15-2 . ملحوظة : جهد اللمس وهو المشكلة الأولى لا

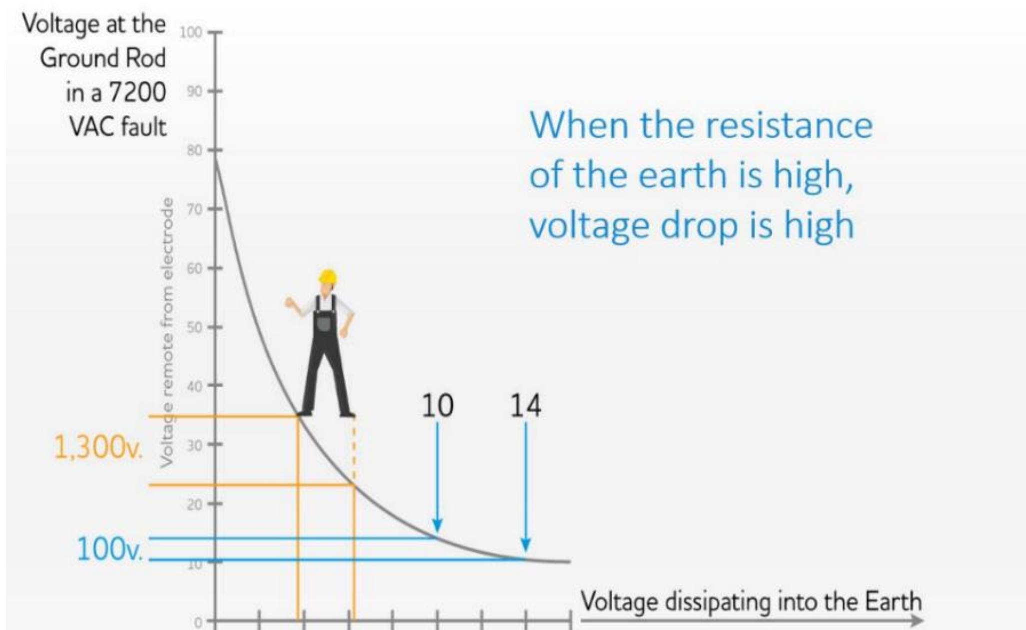


Figure 15-2 GPR

يساوى هذه القيمة كلها بل يساوى الفرق بينها وبين جهد نقطة خروج التيار من الجسم ، وينتهى إلى جهد يساوى صفر عند مركز الأرض كما فى الشكل 15–2.

المشكلة الثانية هنا أن فرق الجهد على سطح الأرض بين 4–6 قدم مثلا من الجهاز المؤرض لايزال مرتفعا ، وقد يصل إلى 1300 فولت كما فى الشكل السابق ، ومن هنا تظهر خطورة جهد الخطوة فى هذه المحطات. وسيتم شرح المزيد عن جهد اللمس وجهد الخطوة لاحق.

ومن هذه المقدمة يمكن الإجابة على السؤال التالى:

لماذا تكون الأعطال فى محطات النقل أخطر من الأعطال فى محطات التوليد؟

فى محطات التوليد يعود تيار العطل من خلال شبكة الأرضى فى المحطة وهى قيمة منخفضة فلا يحدث ارتفاع فى الجهد ، بينما فى محطات النقل يعود تيار العطل من خلال مقاومة الأرض الممتدة من نقطة العطل خارج المحطة وحتى المحطة نفسها فيرتفع الجهد بقدر ارتفاع قيمة مقاومة مسار الرجوع.

15.2.1 جهد اللمس

تعريف جهد اللمس: هو فرق الجهد بين جهد النقطة المعدنية التى يلمسها الإنسان ، وبين جهد شبكة الأرضى التى يقف عليها كما فى الشكل 15–3. ففرق الجهد الذى سيظهر على هذا الشخص سيساوى جهد نقطة اللمس مطروحا منه جهد النقطة التى يقف عليها بقدمه كما فى الشكل ، ويسمى هذا الفرق بجهد اللمس Touch Voltage، مع ملاحظة أن قيمة الجهد عند قدم هذا الشخص سيتوقف على منحنى توزيع الجهد Potential Distribution الذى ظهر فى الشكل 15–2 .

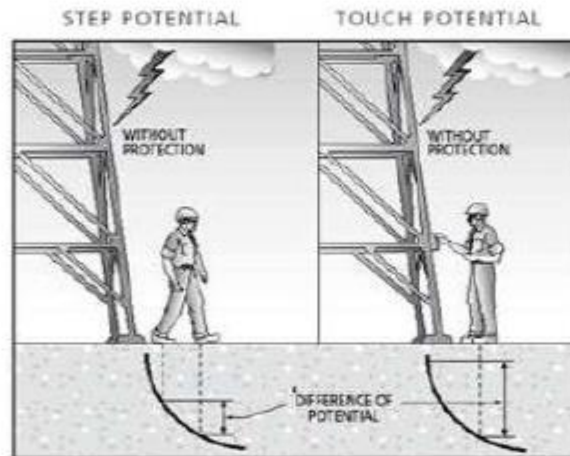


Figure 15 -153 جهد اللمس وجهد الخطوة

15.2.2 لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضى منخفضة جدا؟

لاحظ فى الشكل السابق أن قيمة تيار العطل سيمر خلال مسارين :

- المسار الأول هو المار فى الشخص I_B ، وهذا سيتوقف على عدة عوامل منها قيمة مقاومة جسم هذا الإنسان R_B ، وعلى قيمة المقاومة بين قدمه والأرض R_F (Foot Resistace) ،
- والمسار الثاني سيوقف على مقاومة الأرضى R_E ، ومن ثم كلما كبرت مقاومات المسار الأول كلما كان الشخص فى أمان.

أما مقاومة الجسم فهى فى أقصى قيمة لها ستساوى 10 ك أوم إذا كان الجسم جافا ، ولا توجد جروح فى الجلد . وأما المقاومة بين القدم والأرض فتزيد بالطبع إذا كان الشخص مرتديا حذاء أمان Safety Shoes ، وهذا هو السبب فى إلزام العاملين بالمحطات ارتداء هذه الأحذية .

على الجانب الآخر ستظهر أهمية أن تكون مقاومة إلكترود التأريض أقل ما يمكن حتى يمر معظم تيار العطل فى المسار ذى المقاومة المنخفضة وبالتالى يكون حاصل ضرب التيار فى المقاومة الأرضية أصغر ما يمكن ، ومن ثم يكون هذا الشخص فى أمان من جهد اللمس .

15.2.3 جهد الخطوة

أما إذا كان الشخص واقفا بجوار هذا المحول – ودون أن يلمسه – فهناك إحتمال كبير لظهور فرق جهد بين قدميه لاسيما كلما اقترب العامل من نقطة العطل كما فى الشكل 15-4 حيث يكون معدل ميل منحنى توزيع الجهد كبيرا كلما اقترب من نقطة العطل.

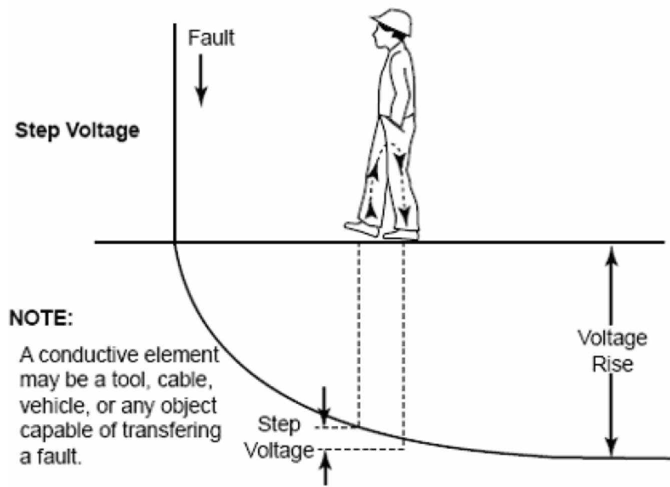
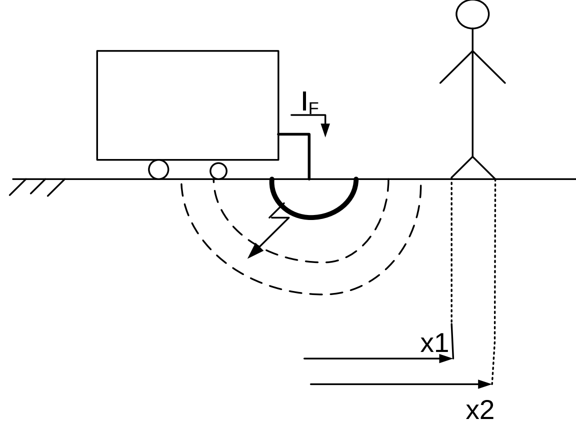


Figure 15-4 جهد الخطوة

فإذا كانت المسافة بين قدميه قدرها $(x_1 - x_2)$ كما فى الشكل فإنه سيكون أيضا معرضا فى حالة تسرب تيار قدره I_F من المحول إلى الأرض لنوع آخر من الجهود يسمى جهد الخطوة Step Voltage ويحسب من المعادلة التالية (بفرض أن إلكترود التأريض من النوع النصف كروى) :



$$V_{step} = \frac{\rho I_f}{2\pi}\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right)$$

ومن واضح أنه كلما زادت المسافة بين قدميه ($X_2 >> X1$) ، كلما صار جهد الخطوة أخطر.

ملحوظة هامة:

هناك فرق بين جهد شبكة الأرضى والذى يسمى ground Potential Rise, GPR ، وبين جهد سطح الأرض ، فجهد سطح الأرض يتغير حسب نوع وسمك طبقة الحصى التى توضع على سطح الأرض ، ويختلف بالطبع حسب وجود شبكة أرضى تحت الأرض من عدمه ، وجهد سطح الأرض دائما يكون أقل من الـ GPR.

15.2.4 كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى أن هذه المشكلة سببها الرئيسى هو الميل الكبير فى منحنى توزيع الجهد ، فلو استطعنا أن نجعل منحنى توزيع الجهد شبه أفقى فهذا يعنى أن الفرق بين أى نقطتين عليه لن يكون كبيرا وبالتالى لن تظهر مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة. والشكل 15-5 يمثل مقارنة بين الجهد الذى يظهر على جسم شخص واقف على الأرض نتيجة لمسه لمحول مؤرض فى حالتين :

1- بواسطة إلكترود مدفون رأسيا فى الجزء الأيسر من الشكل.

2- شبكة تأريض Grid فى الجزء الأيمن من الشكل.

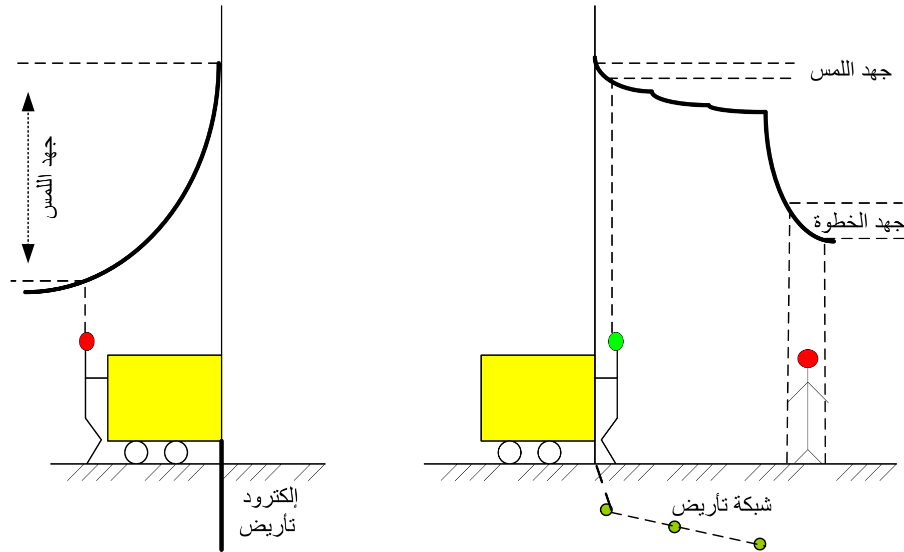


Figure 15-5 Grid and Rod Earthing

إذن فمن ميزات شبكة التأريض أن توزيع الجهد على سطح الأرض Surface Potential Distribution الناشئ نتيجة مرور تيار العطل يكون أفضل من توزيعه فى حالة الإلكترود الواحد المدفون رأسيا .

15.3 شبكات التأريض فى المحطات الكهربية

فى الأماكن مثل محطات التوليد أو محطات المحولات ، يمكن أن تتسبب تيارات الأعطال فى ارتفاع قيمة الجهد على موصلات التأريض لقيم خطيرة على العاملين فى هذه المحطات مالم تكون مقاومة الأرضى فيها شديدة الانخفاض ، ولذا تخضع هذه الأماكن لنظام تأريض مختلف وهو المعروف باسم شبكة التأريض Grid مكونة من مجموعة من الـ Meshed Electrodes تكون المقاومة المحصلة لهم صغيرة جدا .

وغالبا تكون الشبكة من مربعات بأبعاد 100 فى 100 سم (تتغير حسب التصميم) وتغطى كافة مساحة المحطة ، كما فى الشكل 15-6 (أيضا 15-11 لاحقا). لاحظ كيف أن شبكة التأريض تخرج أبعد من سور المحطة.

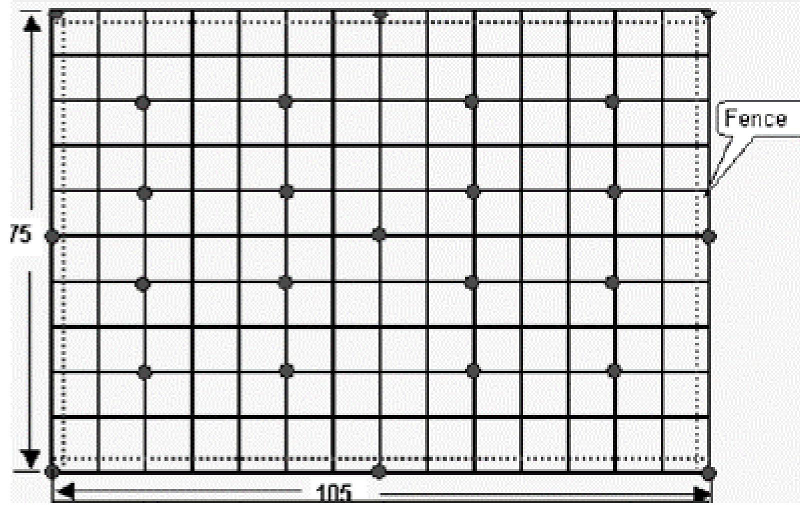


Figure 15 -6 Earthing Grid

وقد تضاف إليهم Earthing mat كما فى الشكل 15-7 عند المناطق عالية الخطورة ، لكن الأهم من ذلك أن هذا النظام يتميز بأن توزيع الجهد فى المساحة المغطاة بالـ Meshed Electrodes يكون شبه متساوى Equi-potential ، وبالتالى ففرق الجهد بين نقطتين متقاربتين يكون صغيرا (يمكن أن يحدث تزايد تدريجى بدءا من نهاية حدود شبكة التأريض).

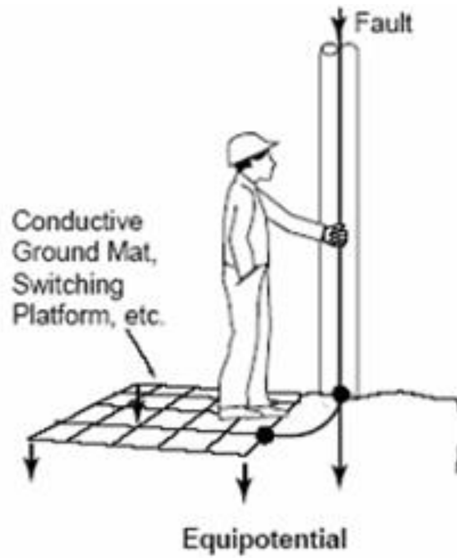


Figure 15-7 Earthing Mat

والشكل 15-8 يبين مستوى الارتفاع فى الجهد فى المناطق المختلفة من مساحة المحطة ، كما يظهر من خلال برامج التمثيل مثل الـ ETAP.

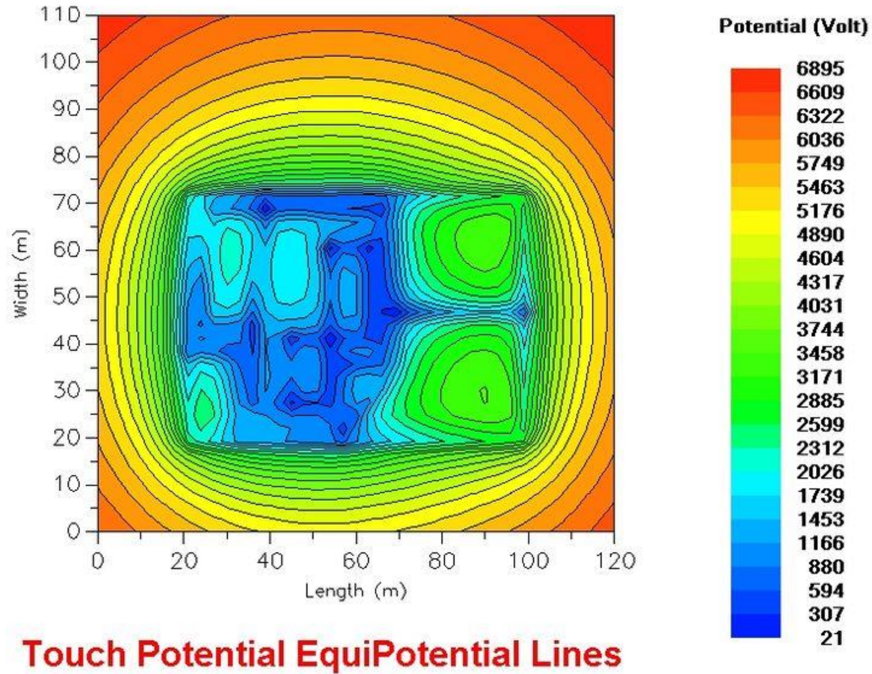


Figure 15-8

15.3.1 ما هى الـــ Ground mat ؟

فى بعض الأحيان قد نستخدم ما يسمى حصيرة أرضية إضافية Grounf mat وهذه لا تستخدم منفردة بل بالإضافة إلى شبكة الأرضى Ground Grid الأصلية ، وذلك فى الأماكن التى يكثر وجود البشر بها داخل المحطة مثل منطقة وقوف العمال أمام عددات القياس مثلا ، وهى عبارة عن موصلات متقاطعة مع بعضها لتكوين شبكة تدفن فوق الشبكة الأصلية (شكل 15-9) ، وأحيانا توضع فوق سطح الأرض مباشرة (شكل 15-10) ، لأن مجرد الوقوف على سطح معدنى يعنى أن جميع أجزائه متساوية الجهد فلا يحدث فرق جهد بين قدمى من يقف عليه .



Figure 15-9 Earthing Mat

ويستخدم هذا الأسلوب فى المناطق التى يكون جهد الخطوة واللمس بها مرتفع نسبيا. وهذه الشبكة قد يتصل وقد لا يتصل بها Earthing Rods عند أركانها.



Figure 15-10 External Earthing Mat

15.3.2 أشكال الـ Earthing Grid

قد تكون شبكة التأريض فى المحطات عبارة عن شبكة تغطى مساحة كافة العنبر (شكل 15-11).

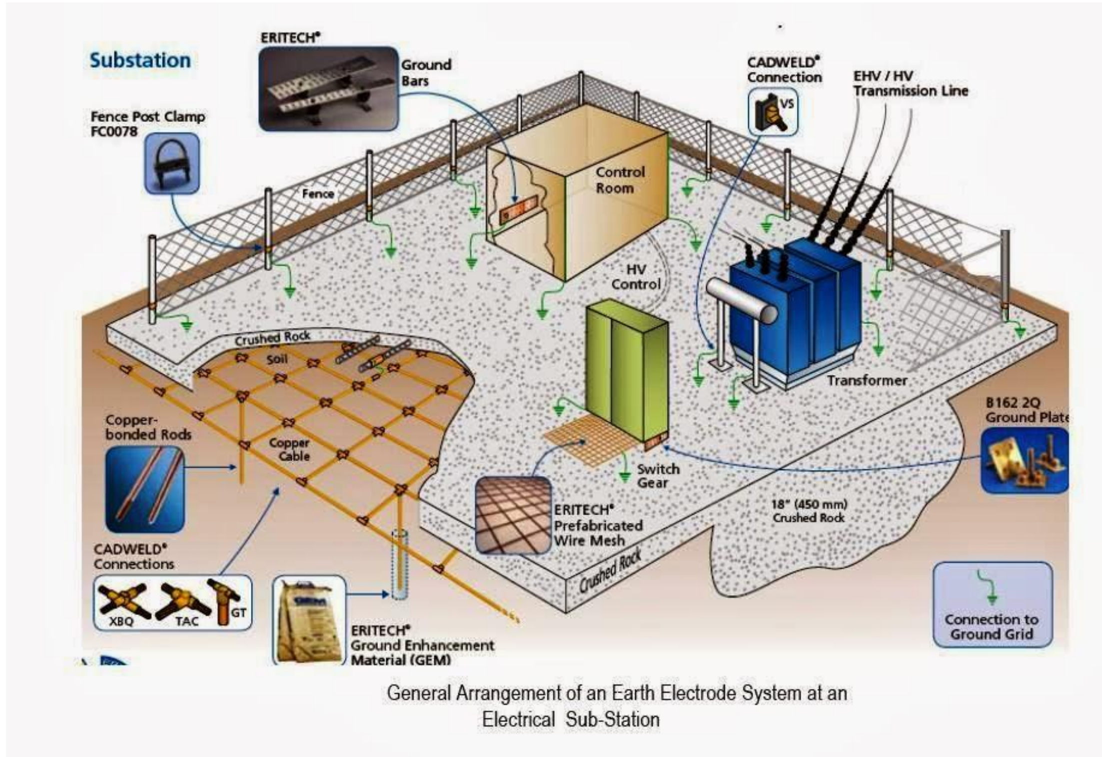


Figure 15-11 Earthing Grid

وقد تكون هذه الشبكة أيضا متصلة بأساسات المبنى كما فى الصورة شكل 15-12 ثم يصب عليهم الخرسانة جميعا (بالطبع بعد توصيل طرف الشبكة خارج سطح الأرض.) وهذا الأسلوب مفيد جدا فى تخفيض جهد الخطوة واللمس لأن شبكة حديد التسليح تعمل كـ Ground mat .

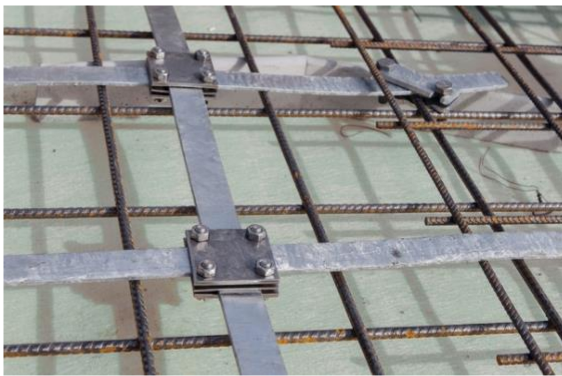


Figure 15-3 الربط مع حديد التسليح

ملحوظة: فى بعض الأحيان يمكن الاكتفاء بحديد التسليح دون الحاجة لموصلات نحاسية.

وحسابات الـ Greound Grid يدخل فيها عدد كبير من المتغيرات وهذا هو ما نناقشه تفصيلا فى الجزء التالى.

15.4 خطوات التصميم

الهدف الرئيسي من عملية تصميم شبكة الأرضى فى المحطات الكهربية ذات الجهد العالي وهو : **التأكد من أن Step Voltage and Touch Voltage ضمن الحدود الآمنة.**

وتحقيق ذلك يتم من خلال حساب العدد المناسب لإلكترودات التأريض وكيفية توزيعها داخل المحطة . ويعتبر البحث القياسى رقم (2000) IEEE STD 80 وعنوانه : Guide for safety in AC substation" grounding". مرجعا أساسيا فى عملية تصميم نظام التأريض فى محطات التحويل.

وفى هذا الفصل سيتم شرح وتلخيص الخطوات القياسية المذكورة فى هذا المرجع على النحو التالى:

1. Measurements of Soil Resistivity
2. Determine Surface Layer Derating Factor
3. Determine Minimum Earthing Conductor Size
4. Calculate Tolerable Step and Touch Potential
5. Layout Preliminary Substation Grid,
6. Determine Preliminary Resistance of Grounding System
7. Determine Grid Current
8. Determine GPR. If Less than Tolerable Touch Voltage, Done.
9. Otherwise: Calculate Actual Mesh and Step Voltages.
10. If Mesh and Step Voltage are Below Tolerable values, Done.
11. Otherwise: Revise Grid.

15.4.1 خطوات ماقبل التصميم

قبل الخوض فى تفاصيل التصميم نذكر أن هناك معلومات يجب توافرها قبل البدء فى التصميم ، وهذه المعلومات المطلوب توافرها هى :

- مخطط عام الموقع وتحديد مساحة المحطة
- أقصى تيار عطل متوقع مروره خلال شبكة التأريض وهذا يحسب من خلال Short circuit Study
- أقصى زمن يستغرقه جهاز الحماية لفصل العطل وهذا يمكن معرفته بعد الانتهاء من الـ Protective Coordination Study ، وسنستفيد منه فى معرفة قيمة الجهد الذى يظهر على جسم إنسان تعرض للصعق بالمحطة حيث أن هذه القيمة تعتمد على زمن بقاء العطل كما سنرى.
- درجة حرارة التربة
- معرفة قيمة المقاومة النوعية للتربة Soil Resistivity بالقياس .
- معرفة قيمة Resistivity لأى طبقة سطحية مضافة على التربة (مثل الزلط مثلا)

كل المعلومات السابقة يفترض أنها معلومة قبل البدء فى خطوات التصميم التالية.

15.4.2 الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة

ربما يكون كافيا فى مشروعات التخرج أن يفترض الطالب قيمة مناسبة للـ Soil Resistivity (المقاومة النوعية للتربة) ، أما حين تنشأ محطة حقيقية فلابد من عمل قياسات عملية للوصول للقيم حقيقية للمقاومة النوعية للتربة. ومن أشهر هذه الطرق طريقة Wenner four-pin method وسبق شرحها فى كتاب المرجع فى التركيبات الكهربية للمؤلف. والجدول 15-2 يعطى قيم تقريبية للمقاومة النوعية حسب نوع التربة (لا تستخدمها فى تصميم حقيقي بل يجب عمل قياسات).

Table 15-2 المقاومة النوعية للتربة

Table 1: Basic Range of Soil Resistivity
Ref. IEEE Std, 80, Table 8. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Type of Earth	Average Resistivity (Ω·m)
Wet Organic Soil	10
Moist Soil	10^2
Dry Soil	10^3
Bedrock	10^4

ويفضل أخذ القياسات عند أكثر من نقطة فى المساحة المقترحة لبناء المحطة ، كما يفضل جعل المسافات بين الإلكترودات الأربعة المستخدمين فى القياس Four Electrode method كبيرة نسبيا وفى حدود 50-100 متر وكلما زادت هذه المسافة كلما كانت القراءة معبرة عن قيمة المقاومة على أعماق كبيرة (تقريبا يمكن اعتبار المقاومة مقاسة على عمق يساوى المسافة بين كل اثنين من الإلكترودات الأربعة).

وقيمة المقاومة الكهربية للتربة تتوقف على كمية الأملاح بالتربة (تزيد بزيادتها) وتتوقف أيضا على حجم حبيبات التربة (أيضا تزيد بزيادتها) فالرمل الخشن مقاومته أعلى من الرمل الناعم ، والزلط مقاومته أعلى من الرمل ، والرمل أعلى من الطين.

15.4.3 الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

دائما تضاف طبقة من الحصى أو الزلط بسمك من 5 إلى 15 سم لتحسين المقاومة النوعية لسطح التربة من أجل أن يقل خطر الـ Touch and Step Voltage . وبالطبع ستتأثر المقاومة النوعية لهذه الطبقة بحالة التربة وهل هى رطبة أم جافة ولذلك ستجد الجدول رقم 15−3 يعطى قيما تقديرية للمقاومة النوعية لهذه الطبقة حسب نوع المادة المستخدمة وحالتها وسمكها.

Table 15-3

Table 2: Typical Surface Material Resistivities.
Ref. IEEE Std, 80, Table 7. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Number	Description of surface material (U.S. State where found)	Resistivity of sample Ω·m	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	140 x 10^6	1300(ground water, 45 Ω·m)
2	1.5 in(0.04m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200(rain water, 100W)
3	0.75-1 in(0.02-0.025 m) granite (Calif.) with fines	-	6513(10 min after 45 Ω·m water drained)
4	#4 (1-2in) (0.025-0.05 m) washed granite (Ga.)	1.5 x 10^6 to 4.5 x 10^6	5000 (rain water, 100 Ω·m)
5	#3 (2-4 in) (0.05-0.1 m) washed granite (Ga.)	2.6 x 10^6 to 3 x 10^6	10 000 (rain water, 100 Ω·m)
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	7 x 10^6	2000-3000 (ground water, 45 Ω·m)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02m) gravel	2 x 10^6	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40 x 10^6	5000
9	#57 (0.75 om) (0.02 m) washed granite (N.C.)	190 x 10^6	8000 (ground water, 45 Ω·m)
10	Asphalt	2 x 10^6 to 30 x 10^6	10 000 to 6 x 10^6
11	Concrete	1 x 10^6 to 1 x $10^{9\,a}$	21 to 100

وأهمية هذه الطبقة تأتى من أنها تلمس مباشرة قدمى الشخص وهذه الطبقة غير سميكة وسطحها غير منتظم ، ومن ثم سنحتاج لحساب معامل تصحيح Cs لتصحيح قيمة مقاومة سطح التربة ، و ستسهم هذه الطبقة فى تقليل مقاومة الأرضى إن وجدت وذلك بنسبة تساوى هذا المعامل Cs الذى تتوقف قيمته على المقاومة النوعية للتربة الأصلية وسمك الطبقة السطحية كما فى المعادلة التالية:

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

Where C_s is the surface layer derating factor

ρ is the soil resistivity (Ω.m)

ρ_s is the resistivity of the surface layer material (Ω.m)

h_s is the thickness of the surface layer (m)

وسنستفيد من هذا المعامل لاحقا عند حساب الـ Touch and Step Voltage

ومعامل التصحيح Cs يساوى واحد إذا لم تكن هناك طبقة على السطح ، ويصبح أقل من الواحد فى وجود هذه الطبقة الرقيقة .

وهذه الطبقة لها ميزات عديدة ، فهى بالإضافة إلى كونها تعتبر مقاومة موصلة على التوالي مع جسم الإنسان مما يعنى أن التيار خلال الجسم سينخفض وقد يصل إلى عشر قيمته ، وهذه هى الميزة الأساسية لها ، فهى أيضا تعيق تبخر الماء من التربة الأصلية فتحافظ على انخفاض قيمة مقاومة التربة.

15.4.4 الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود

أحد أهداف عملية التصميم هو حساب مساحة المقطع المناسب لكل إلكترود من إلكترودات التأريض وعددهم .

وفى هذه الخطوة سنحسب مساحة المقطع المناسبة.

وكما هو معلوم فإن مساحة مقطع الموصل تتوقف أساسا على قيمة تيار القصر والتيار الطبيعى ، ولكن على عكس الكابلات العادية والتى تكون حدود تحملها لتيار القصر متوقفا على تحمل العازل لدرجة الحرارة العالية الناشئة من القصر قبل أن يحدث له melting ، فإن كبلات التأريض لا يوجد عازل عليها ، ومن ثم فالحد الأقصى هو تحمل الموصل نفسه للحرارة لمدة معينة قبل أن يحدث له melting (وهذا يفسر لك أحد أسباب عدم وجود عازل على موصلات التاريض) ، وهذه الدرجة يمكن الحصول عليها من الجدول 15-3 ، وقد تصل فى بعض المواد إلى فوق الـ 1000 درجة مئوية ، لكن للأمان فإن معظم التصميمات تكتفى بحساب حرارة الموصل عند 500 أو 800 درجة فقط.

لاحظ أن أقصى تيار قصر يتحمله الموصل يتوقف أساسا على المدة الزمنية التى يستغرقها مرور هذا التيار قبل فصله بأجهزة الحماية ، ولذا فمن المعلومات الأساسية المطلوب للتصميم : زمن تشغيل أجهزة الوقاية . ويمكن الرجوع فى هذه النقطة لكتاب المرجع فى التركيبات الكهربية.

والـ IEEE-80 تعتبر زمن الفصل يمكن أن يتأخر حتى يصل إلى 3 ثوانى فى المحطات الصغيرة عند تصميم منظومة الأرضى .

وعموما فحساب مقطع موصل الأرضى يعتبر خطوة عامة فى تصميمات الأرضى ، ولا علاقة لها بالـ GPR أو جهد الخطوة ، وجهد اللمس.

<u>طريقتان لحساب هذا المقطع:</u>

توجد طريقتان لحساب هذا المقطع :

<u>الطريقة الأولى</u> : باستخدام المعادلة التقريبية الواردة فى مواصفات الـ IEEE وهى:

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{\dfrac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln \cdot \left(1 + \dfrac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Where

I : rms current (kA)

A_{mm^2} : conductor cross section (mm^2)

A_{kcmil} : conductor cross section (kcmil)

T_m : maximum allowable temperature (°C)

T_a : ambient temperature (°C)

α_r : thermal coefficient of resistivity at reference temperature T_r (1/°C)

ρ_r : resistivity of the ground conductor at reference temperature T_r (μΩ-cm)

t_c : duration of current (s)

K_0 : equals $1/\alpha_0$ or $(1/\alpha_r) - T_r$ (°C)

$TCAP$: thermal capacity per unit volume ($J/cm^2 \cdot °C$)

والثوابت السابقة تجد قيمتها فى الجدول رقم 15-4

For example. commercial hard-drawn copper has material constants:

- درجة انصهار الموصل T_m = 1084 ºC
- α_r = 0.00381 $ºC^{-1}$
- ρ_r = 1.78 μΩ.cm
- $TCAP$ = 3.42 $Jcm^{-3}\,ºC^{-1}$.
- *Tc = duration = 0.5 sec*
- K_0 = 234

<u>والطريقة الثانية</u> هى معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهى:

$$A\,(mm^2) = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76\,t}{ln\frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}$$

ومنها يمكن حساب قطر الموصل d وهذا سيستخدم فى الخطوة التاسعة.

وهناك معادلة أخرى تقريبية

$$A\,(mm^2) = 8.832 \times I_{GF} \times \sqrt{T_C}$$

ويمكن فرض مقطع للموصل مباشرة حسب الـ IEEE-665-1995 بحيث يتم اختيار مقطع يتحمل نصف قيمة تيار العطل (أو 60% إذا أردت مزيدا من الأمان) ، وذلك على اعتبار أن تيار العطل يتسرب من جهتين خلال شبكة الأرضى.

اختيارات عملية:

1. زمن الفصل يؤخذ دائما نصف ثانية للأمان.
2. فى بعض التصميمات يؤخذ حرارة انصار العزل فى الاعتبار حيث تكون هناك بعض الأجزاء معزولة (لون عزل أسلاك الأرضى هو الأخضر فى أصفر) ففى هذه الحالة نعتبر درجة الحرارة ليست حرارة انصهار موصل الأرضى والتى قد تصل لـ 1000 درجة كما رأينا بل قد تحسب على أنها 200 درجة فقط. ولذا يجب التأكد أولا من وجود أو عدم وجود موصلات معزولة فى منظومة التأريض لأن هذا سيغير من مساحة مقطع الموصل.
3. مقطع الموصل غالبا لا يقل عن 120 مم2
4. القيمة الكلية لتيار القصر I_{GF} لابد أن تأخذ فى الاعتبار قيمة مجموع تيارات الأعطال من داخل المحطة ومن خارجها. وتضاف نسبة أمان للتوسعات المستقبلية التى قد ترفع من قيمة تيار العطل.

Table 15-4 أنواع الموصلات

Table 3-Material Constants
Ref. IEEE Std 80-2000 Table 1.

Description	Material Conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing[a] temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C (μΩ-cm)	TCAP thermal capacity [J/(cm³·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod[b]	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	64.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.00347	2268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel-1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod[c]	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

[a]From ASTM standards.
[b]Copper-clad steel rods based on 0.254 mm (0.010 in) copper thickness.
[c]Stainless-clad steel rod based on 0.508 mm (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

.5

15.4.5 الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس

عندما لا يجد تيار العطل مسارا ليكمل الدائرة سوى بالرجوع خلال الأرض تكون هناك خطورة من ارتفاع جهد الأرض حول منطقة العطل ويسمى GPR Ground Potential Rises وهذا يعنى أن أى شخص يقف على هذه الأرض يكون معرضا لصدمة كهربية إما نتيجة فرق الجهد بين قدميه Step Voltage أو نتيجة فرق الجهد بين الجسم المعدنى الذى لمسه وبين الأرض Touch Volt.

فإذا كان لدينا شبكة تأريض مناسبة فستقوم بتبديد تيار العطل بعيدا فى عمق الأرض ، وبالتالى لايظهر GPR على سطحها وهذا كما ذكرنا فى المقدمة هو الهدف الأساسى من التصميم وهو أن نحصل على شبكة قادرة على جعل جهد الخطوة وجهد اللمس ضمن الحدود الآمنة بالمحطة. ومن هنا كان لابد أن نحسب أولا قيم هذه الحدود الآمنة حتى نقارنها بقيم GPR التى يمكن أن تظهر على الشبكة.

والمعادلات التالية تعطى قيم تقريبية لجهد الخطوة وجهد اللمس (لاحظ أن تتوقف على وزن الشخص وتتوقف على نوع التربة والطبقة السطحية ومدة بقاء تيار العطل قبل فصله بأجهزة الوقاية). لاحظ أيضا أهمية أن تكون منظومة الوقاية سريعة بالدرجة الكافية لتقليل هذه الجهود.

50kg person

$$E_{touch,50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person:

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

50kg person:

$$E_{step,50} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person:

$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Where E_{touch} is the touch voltage limit (V)

E_{step} is the step voltage limit (V)

C_s is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2)

ρ_s is the soil resistivity (Ω.m)

t_s is the maximum fault clearing time (s)

ملحوظة:

أصل المعادلات السابقة يمكن كتابتها على النحو التالى:

$$E_{step} = (R_B + 2 \times R_F) \times I_B$$

$$E_{Touch} = (R_B + R_F \div 2) \times I_B$$

والرقم 1000 فى المعادلات السابقة يمثل قيمة مفترضة لمقاومة جسم الإنسان.

لاحظ فى حالة الـ Touch volt تكون المقاومتان أسفل القدمين R_{Foot} موصلتان على التوازى ولذا تقسم RF على 2 ، بينما فى حالة الـ Step Volt تكونان على التوالي ولذا تضرب فى 2 كما فى المعادلتين الأخيرتين.

15.4.6 الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها

يختلف توزيع الجهد على سطح الأرض الناشئ نتيجة مرور تيار العطل خلال هذه الإلكترودات , Surface Potential Distribution فيكون أفضل فى حالة الشبكة المكونة من عدة إلكترودات منه فى الإلكترودات المدفونة رأسيا. ففى حالة الإلكترودات الأفقية (أو الشبكة) يكون قيمة الجهد الذى ينشأ على سطح الأرض بين نقطتين فى المنطقة القريبة من الجسم المؤرض نتيجة مرور تيار العطل صغيرا جدا .

ولذا ستجد دائما فى محطات التحويل أننا نستخدم شبكة تأريض عبارة عن موصلات أفقية على شكل مربعات بطول ضلع يتراوح بين 3-6 متر ، بينما يصل طول الضلع فى تأريض محطات التوليد من 10 إلى 20 متر. وتوضع هذه الشبكة أسفل أرضية المحطة لضمان انخفاض قيمة جهد الخطوة وجهد اللمس كما فى الشكل 15-13. لاحظ أن كل هذه الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية بمتر تقريبا ثم سنضيف لها إلكترودات رأسية إما عند نقاط التقاطع على محيط الشكل أو عند كافة نقاط التقاطع كما سنرى.

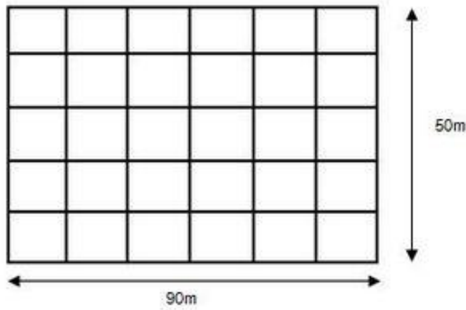


Figure 15-4

15.4.7 الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى

مقاومة شبكة الأرضى التى تم رسمها فى الخطوة السابقة تحسب من المعادلة التالية

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Where R_g is the earthing grid resistance with respect to remote earth (Ω)

ρ is the soil resistivitiy (Ω.m)

L_T is the total length of buried conductors (m)

A is the total area occupied by the earthing grid (m^2) مساحة الأرض وليست مساحة الموصلات

h is the depth of the earthing grid (m)

ويتضح منها أن قيمة المقاومة تتوقف على :

1- إجمالى أطوال الموصلات الأفقية المستخدمة فى شبكة المربعات (الخطوة السابقة)

2- إجمالى عمق الإلكترودات الرأسية (الخطوة السابقة)

3- عمق الدفن

4- المساحة المغطاة بشبكة التأريض (معلومة)

5- المقاومة النوعية للتربة (خطوة -1)

وكما ذكرنا فهذه المقاومة ليست مقاومة كمية النحاس المدفون بل هى المقاومة المكافئة من نقطة التلامس حتى مركز الأرض.

15.4.8 الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض

وهو أقصى تيار عطل يمكن أن نحصل عليه من حسابات الـ Short Circuit . والأصل أن أقصى تيار هو الـ 3-phase short circuit current ويحسب من المعادلة التالية

$$I_{k3} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|}$$

أما عطل الـ Single phase فيساوى

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} = \frac{3 \cdot I_{k3}}{2 + |Z_0 / Z_1|}$$

علما بأن تيار العطل يمكن أن يحدث له نقصان بنسبة S_f ، أو زيادة بنسبة D_f:

فيمكن أن ينقص نتيجة ما يسمى Surface factor, S_f (قيمته بالطبع ستكون أقل من واحد لكن لزيادة الأمان يمكن اعتباره يساوى واحد) ، ونقصد بذلك أن التيار يمكن ألا يرجع من خلال شبكة الأرضى فقط بل يمكن أن يعود جزء منه خلال أغلفة الكابلات مثلا والباقى خلال شبكة الأرضى. لاحظ أن فرض قيمى $S_f = 1$ يعتبر نوعا من الأمان لكن على حساب التكلفة حيث ستزيد عدد الإلكترودات.

والشكل 15-14 يبين فكرة توزيع تيار العطل وطريقة رجوعه لمصدره. فتيار العطل الأصلى قيمته عند نقطة العطل كانت 2720 أمبير ، لكن هذا التيار رجع لنقطة التعادل فى المحول المغذى لهذا العطل من طريقين:

- الطريق الأول خلال تأريض كل برج حيث تسرب جزء من التيار ويتجمع ويعود عن طريق خط الأرضى الممتد فوق هذه الأبراج وهذا التيار مجموعه 875 أمبير (أو قد يعود خلال الـ Cable Sheath إذا كان النقل عبر كابلات أرضية). وهذا التيار لا يتسبب فى GPR ، ولذا لا يدخل فى حسابات جهد اللمس وجهد الخطوة.
- والطريق الثانى لرجوع تيار العطل كان من خلال الأرض مباشرة ومن ثم إلى إلكترودات شبكة التأريض بالمحطة ومنها لنقطة التعادل وهذا الجزء يساوى 1121 أمبير كما فى الشكل 15-11. وهذا هو الجزء الذى يهمنا لأنه المتسبب فى رفع قيمة جهد الأرض. ولذا يحسب GPR كالتالى:

$$GPR = I_G R_G$$

حيث I_G يمثل الجزء الثانى فقط من تيار العطل.

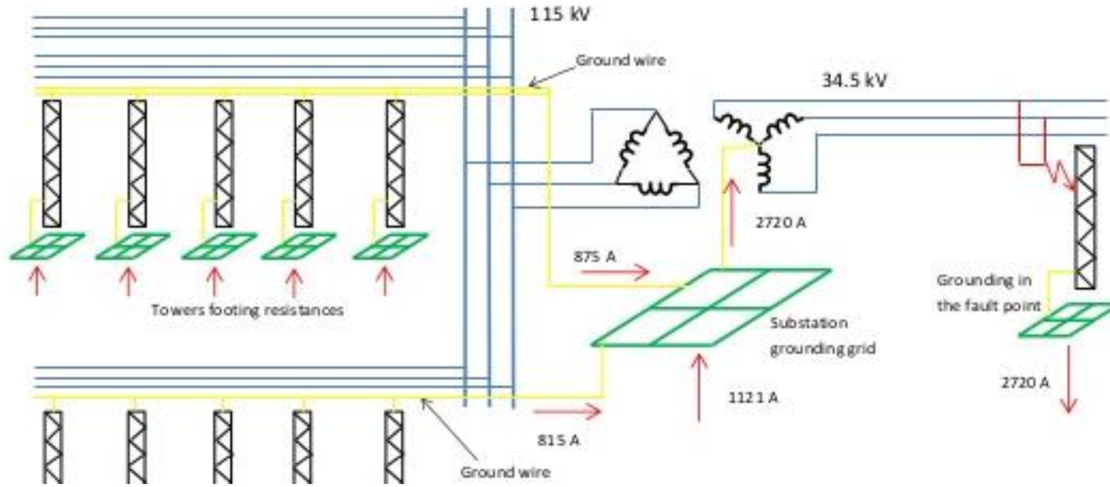


Figure 15-5 مسارات رجوع تيار العطل الخارجى

على الجانب الآخر ، هناك جزء إضافى يمكن أن يزيد من قيمة التيار نتيجة الـ magnetic coupling وأيضا نتيجة إحتمال وجود DC component فى العطل والتى تتوقف قيمتها على Time Constant الخاص بالشبكة ومكان العطل و هذا يحتاج إلى تقريب فى حسابه. وعموما نسبة الإضافة تسمى Decrement factor وهى D_f تحسب من المعادلات التالية

$$I_G = I_g D_f$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}\left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}}\right)}$$

$$T_A = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

t_f is the duration of the fault (s)

T_A is the dc time offset constant (see below)

يمكن اعتبار ' $D_f = 1.25$ للتبسيط

15.4.9 الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR

فى هذه الخطوة نحسب قيمة الارتفاع فى الجهد على شبكة الأرضى نتيجة حدوث عطل

$$GPR = I_G R_g$$

Where GPR is the maximum ground potential rise (V)

I_G is the maximum grid current found earlier in Step 7 (A)

R_g is the earthing grid resistance found earlier in Step 6 (Ω)

ملحوظة :

- إذا كانت $GPR < V_{step-4}$ فهذا يعنى بالتأكيد أن التصميم صحيح ونكون قد نصل لنهاية خطوات التصميم
- لكن إذا كانت $GPR > V_{step-4}$ فقد يكون التصميم سليما وقد يكون خاطئا ويصبح الفيصل فى الحكم هو القيم التفصيلية لجهدى الخطوة واللمس التى سنحسبها فى الخطوة التالية. ولذا قد نحسب فى بعض الحالات القيم التفصيلية ونكتشف أنها أقل من المسموح رغم أننا لم نغير شيئا فى التصميم وهذا يؤكد على ما قلناه أن كون الـ GPR كبيرا لا يعنى بالضرورة خطأ التصميم.

15.4.10 الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين

تحقيق القيم الآمنة لقيم هذه الجهود هو الهدف الأسمى لتصميم شبكة الأرضى كما ذكرنا فى المقدمة .

أولا حساب جهد اللمس

فأما قيمة جهد اللمس (ويسمى Mesh Voltage) فتحسب من المعادلة

$$E_m = \frac{\rho_s K_m K_i I_G}{L_M}$$

Where :: ρ_s is the surface soil resistivity (Ω.m)

is the maximum grid current (A) I_G

is the geometric spacing factor (see below) K_m

is the irregularity factor (see below) K_i

is the effective buried length of the grid (see below) L_M

ثانيا حساب جهد الخطوة

المعادلة التالية تعطة قيمة جهد الخطوة:

$$E_s = \frac{\rho_s K_s K_i I_G}{L_S}$$

Where :: ρ_s is the soil resistivity (Ω.m)

I_G is the maximum grid current (A)

K_s is the geometric spacing factor (see below)

K_i is the irregularity factor (as derived above in the mesh voltage calculation)

L_S is the effective buried length of the grid

والحسابات هنا تأخذ فى اعتبارها بالإضافة إلى قيمة تيار العطل قيمة التباعد بين الموصلات الأفقية وعمق دفن الإلكترودات الرأسية ومجموع أطوال الموصلات المدفونة تحت الأرض أفقيا ، وأيضا مجموع أطوال الالكترودات الرأسية. ويمكن الرجوع للمرجع الأصلى للمزيد من تفاصيل هذه الثوابت.

مع ملاحظة أن البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP تعتبر مثالية لتنفيذ هذه الحسابات ، وما عليك سوى فهم معانى المفردات المستخدمة فى هذه البرامج ، وإدخال البيانات المناسبة لشبكتك.

15.4.11 الخطوة العاشرة : المقارنات

وصلنا لنهاية الرحلة وبقى فقط أن نتأكد هل هذا التصميم يحقق الحدود الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس (وهو الهدف الأسمى للتصميم) أم لا. فإذا تحقق الشرطان التاليان فالتصميم صحيح :

- $E_m < E_{touch}$
- $E_s < E_{step}$

وإلا نعيد التصميم مع عمل بعض التعديلات منها مثلا:

1- تقليل مقاومة الأرض بزيادة عدد الإلكترودات أو زيادة مساحة المقطع.

2- تقليل تيار العطل باستخدام الـ Current Limitter مثلا

3- تحسين المقاومة التربة

4- تحسين المقاومة النوعية لسطح التربة

EXAMPLE

المعطيات:

1- المساحة 50 متر عرض و 90 متر طول

2- تيار القصر 3.15 kA أمبير

3- زمن فصل العطل 0.5 sec

4- زمن الإحساس بالصدمة 0.15 sec

5- درجة الحرارة 40 درجة مئوية

6- المقاومة النوعية للتربة 300 Ω.m

7- المقاومة النوعية للطبقة السطحية 3000 Ω.m بسمك 10 سم

الحل

الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة

- طبقا للمعطيات فإن المقاومة النوعية للتربة تساوى .300 Ω.m

الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

- طبقا للمعطيات نجد أن المقاومة النوعية للطبقة السطحية 3000 Ω.m بسمك 10 سم وبالتعويض بهذه القيم (المقاومة النوعية للتربة وسطح التربة وسمك طبقة سطح التربة فى معادلة حساب Cs نحصل على الاتى:

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

- $$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$
- $$= 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{300}{3{,}000}\right)}{2 \times 0.1 + 0.09}$$
- $$= 0.7207$$

الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود

بالتعويض فى المعادلة

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln \cdot \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)}}$$

الطريقة الأولى : بالتعويض فى المعادلة السابقة:

$$A = 31{,}5 \cdot \sqrt{\frac{\frac{0{,}5 \cdot 0{,}00381 \cdot 1{,}78 \cdot 10^4}{3{,}42}}{\ln \cdot \left(1 + \frac{1084 - 40}{242 + 40}\right)}} = 80{,}4\ mm^2$$

- T_m = 1084 ºC درجة انصهار الموصل
- α_r = 0.00381 ºC^{-1}
- ρ_r = 1.78 μΩ.*cm*
- *TCAP* = 3.42 *Jcm*$^{-3}$ºC^{-1}.
- *Tc = duration = 0.5 sec*
- K_0 = 242
- Ta = 40 º*C*

والطريقة الثانية هى معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهى:

$$\boldsymbol{A\ (mm^2) = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76\,t}{ln\frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}}$$

ومنها أن الموصل المناسب هو 100 ملم2 واحتياطا سنأخذه 120 ملم2

الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس

- 70kg person: $E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\dfrac{0.157}{\sqrt{t_s}}$
- 70kg person: $E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s)\dfrac{0.157}{\sqrt{t_s}}$

C_s is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2) = 0.7207

ρ_s is the surface soil resistivity (Ω.m) 3000 معطى

t_s is the maximum shock time (s) = 0.150 s زمن الإحساس بالصدمة معطى

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + 1.5 \times 0.7207 \times 3,000)\frac{0.157}{\sqrt{0.15}}$$

$= 1,720.04$ V

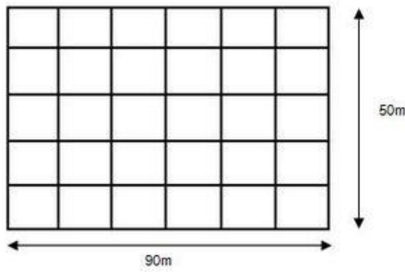
$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + 6 \times 0.7207 \times 3,000)\frac{0.157}{\sqrt{0.15}}$$

$= 5,664.03$ V

الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها

لدينا مساحة 90x50 فسيكون لدينا شبكة كما فى الشكل (6 صفوف و 7 أعمدة).



- الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية نفترض أنها على عمق 60 سم فى هذا المثال
- ثم سنضيف لها إلكترودات رأسية (بطول 3 متر) عند نقاط التقاطع الواقعة على محيط الشكل الخارجى وعددها هنا يساوى 22 نقطة .
- مقطع الموصل 120 ملم من الخطوة الثالثة

الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

ρ = 300 (Ω.m) معطى

L_T = 90x6 صفوف+ 50x7 عمود + 22x3 الكترود رأسي = 956 (m)

h = 0.6 (m)

A = 50 x 90 = 4500 m^2

$$= 300 \left[\frac{1}{956} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4,500}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6\sqrt{20/4,500}} \right) \right]$$

$$= 2.2753\Omega$$

الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض

سنفترض هنا للتسهيل أن تيار العطل بكامله يرجع من خلال شبكة الأرضى ولا يتفرع منه شئ (division factor is 1) وفرضا X/R تساوى 15 عند حدوث العطل وزمن العطل كما ذكرنا سابقا 150 مللى ثانية وسنحاول حساب الـ Decrement Factor, D_f

$$T_A = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$
$$= 15 \times \frac{1}{2\pi 50}$$
$$= 0.04774$$

The decrement factor is then:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}\left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}}\right)}$$
$$= \sqrt{1 + \frac{0.04774}{0.15}\left(1 - e^{\frac{-2\times 0.15}{0.04774}}\right)}$$
$$= 1.1479$$

ومنه نحسب قيمة I_G

$I_G = I_g D_f = 3.15 \times 1.14 = 3.559$ kA

أحيانا يؤخذ $D_f = 1.25$ للتسهيل

الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR

$$GPR = I_G R_g$$
$$= 3,559 \times 2.2753$$
$$= 8,097 \text{ V}$$

بما أن هذه القيمة تجاوزت القيم الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس فى الخطوة الرابعة فهذا يعنى أننا بحاجة لحساب القيم التفصيلية لجهد اللمس وجهد الخطوة مع إعادة التصميم

الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين

أولا حساب جهد اللمس

باستخدام برنامج الـ ETAP وبإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد اللمس المحسوب يساوى 1661 فولت فى حين أن القيمة المسموح بها هى 1720 فولت وهذا يعنى أن التصميم قد تجاوز هذه الخطوة بنجاح.

ثانيا حساب جهد الخطوة

باستخدام برنامج الـ ETAP وبإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد الخطوة المحسوب يساوى 723 بينما الجهد المسموح به هو 728 وهذا يعنى أنه تجاوز هذه الخطوة أيضا بنجاح.

الخطوة العاشرة المقارنات

الآن وضح من الحسابات التفصيلية أن التصميم باستخدام هذه الأعداد من الموصلات الأفقية والرأسية يعتبر الآن كافيا وآمنا.

ملحوظة هامة:

فى الساحات التى ليس بها هياكل معدنية فليس هناك إحتمال أن يصاب أحد بصدمة كهربية نتيجة لمس شئ ، لكن المشكلة ستكون فقط فى جهد الخطوة ، ومن ثم يكون الاهتمام به فقط وهذا يمكن أن يؤدى إلى تقليل شبكة النحاس المستخدمة فى التأريض إذا أخذت هذه النقطة فى الاعتبار.

16

الأنظمة المساعدة فى محطات التحويل

هناك العديد من الأنظمة التى تصنف بـ Auxilary System ، وترتبط ارتباطا وثيقا بالمعدات الأساسية بالمحطة مثل :

1. منظومة تغذية مساعدات المحطة سواء بالـ AC Supply أو من خلال منظومة الـ DC Supply.
2. أجهزة الحماية والقياس : التي تقوم بحماية الدوائر الكهربية وقياس القيم الكهربية.
3. لوحات التحكم ومعدات الاتصالات : التي تقوم بالتحكم بتشغيل الأجهزة والمعدات الكهربية إما عن طريق مركز المراقبة والتحكم باستخدام معدات الاتصالات المتوفرة في المحطة أو مباشرة من داخلها عن طريق شخص يكون مكلفا بذلك .
4. أجهزة الفحص ومعدات السلامة والإطفاء وأجهزة التكييف والتبريد والتدفئة.
5. عدادات الطاقة الكهربية ولوحات تسجيل الأعطال ولوحات الإشارة والإنذار.

القسم الرابع بالمحطات

تغذية مساعدات المحطة

يوجد بالمحطة نظامين لتغذية المساعدات **Auxilaries** :

16.1 التغذية بنظام الـ AC SYSTEM:

وهو عبارة عن (Auxiliary Transformer + Distribution Board) وذلك لتغذية الأحمال الداخلية في المحطة مثل إضاءة المحطة و التكييف والمضخات وكباسات الهواء **compressors** إلخ. حيث يوجد بالمحطة محول مساعد أو أكثر يقوم بخفض الجهد من 11kV إلى 380 volt ليغذى الـ Main Distribution Board التي تقوم بدورها بتغذية أحمال المحطة.

والأحمال التى تتم تغذيتها بنظام الـ AC Auxiliary System تكون عادة:

1- لوحات الحماية Protection Panels
2- لوحات التحكم GIS Control Panels
3- لوحات توزيع المبانى Buildings Power Distribution Boards
4- لوحات توزيع نظام التكييف Building HVAC Distribution Board
5- لوحات توزيع الاضاءة Building HVAC Lighting Board
6- MV Switchgear
7- UPS AC Loads
8- نظام إطفاء الحريق و المضخات

16.2 التغذية بنظام الـ DC SYSTEM:

وهو عبارة عن (Chargers + Batteries) .

ويوجد داخل كل محطة تحويل غرفة للبطاريات ، ويوجد بها مجموعات البطاريات الحمضية (قلوية في بعض المحطات) المستخدمة فى تغذية دوائر الوقاية والطوارئ (220 / 110 فولت) وكذلك دوائر الاتصالات (48 فولت).

وتوجد البطاريات في غرفة خاصة حيث تنظم في صفوف كما فى الشكل 16-1 . وتجري على البطاريات اختبارات دورية منها قياس المقاومة الداخلية و قياس جهد العمود وتركيز سائل البطارية.



Figure 16-1 Batteries

وفى بعض المحطات توجد جميع البطاريات فى غرفة واحدة ، و فى بعض المحطات توجد كل مجموعة بطاريات فى غرفة منفصلة ، كما تخصص غرفة منفصلة للشواحن Battery Charger ، و لا يتم وضعها مع غرفة البطاريات حتى لا تتأثر بالغازات الخارجة من البطاريات.

والأحمال التى يتم تغذيتها بجهد 220V DC هى :

a. إنارة الطوارئ Emergency Lighting
b. لوحات حماية الكابلات Cables Protection Panels
c. لوحات حماية المحول Transformer Protection Panels
d. لوحات حماية رابط قضبان التوزيع Bus Coupler Protection Panels
e. لوحات حماية قضبان التوزيع Bus bar Protection Panels

f. لوحات التحكم عن بعد Remote Control Panels

g. لوحات حماية الدخل Incoming Protection Panels

h. لوحات حماية الخرج Outgoing Protection Panels

i. 11 KV Switchgear

ملحوظة هامة:

العديد من الأجهزة الموجودة داخل المحطات من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحياتها. ولأهمية هذه الأنظمة ، فدائما يؤخذ فى الاعتبار أن تكون سعة البطاريات كافية لتشغيل المحطة لمدة لا تقل عن 8 ساعات متصلة.

16.2.1 الشواحن : (Battery Chargers)

وظيفة شاحن البطاريات battery charger في المحطات (شكل 16-2) هى:

1- إمداد جميع المعدات و أجهزة الوقاية بالتيار المستمر اللازم لتشغيلها.

2- شحن البطاريات.

وتغذي الشواحن لوحات توزيع (DC Panel) ، وكل لوحة تغذى مجموعة من الأحمال ، بالإضافة إلى تغذية واحدة من مجموعات البطاريات . كما توجد بغرفة الشواحن على الـ (DC Panel) عدادات لمتابعة حمل كل شاحن وقراءة جهد الخرج منه.



Figure 16-2 شاحن البطاريات

16.2.2 طرق شحن البطاريات :

1- الشحن الطبيعي أثناء التشغيل : (Floating) ويكون تيار الشحن ضعيفا (حيث توصل البطارية طوال الوقت بالشاحن لكي يقوم بتعويض عملية التفريغ الداخلي التي تحدث داخل البطارية).

2- الشحن السريع (Equalizing) يكون جهد الشحن أعلى من جهد البطارية وأعلى من جهد الشحن العادى لتنشيط البطارية لأول مرة ، كما توضع عليه البطارية بعد كل عملية صيانة لمدة لا تقل عن ثمان ساعات فأكثر. وعموما لا يفضل الشحن السريع (high rate) لها إلا فى الاحتياج الشديد.

16.2.3 هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟

بعض الناس يظنون أن البطارية عبارة عن وعاء فارغ تصب فيه الإلكترونات كصب الماء ، ومن وجهة نظره أن الوعاء إذا سكبت الماء فيه بسرعة يملأ بسرعة وإذا سكبت فيه الماء ببطء يملأ ببطء، وهذا غير صحيح فى حالة البطارية ، فالبطارية القابلة للشحنة تحتوي على مركب كيميائي يحتاج للوقت ليتكون بصورة صحيحة ، ومن ثم فالسرعة والبطء كلاهما مرفوض ولذا فشركات البطاريات تحدد أنسب تيار للشحن حتى لا تفسد البطارية. (يرجع فى ذلك للكتالوج.)

16.2.4 عيوب وميزات البطارية الحامضية

أهم عيوب هذه البطاريات أنها:

- تحتاج لصيانة أكثر من البطاريات القلوية
- عمرها الافتراضى أقل
- حجمها كبير نسبيا وأثقل وزنا
- تتعرض لعملية الكبرتة sulphation (تكون أملاح الكبريتات عليها ويمكنها أن تسبب تلف البطارية)
- تصاعد الهيدروجين قد يؤدى إلى انفجار نتيجة اختلاطه بالأكسجين ولا يحدث ذلك إلا إذا زادت نسبة الهيدروجين عن 14% فى الغرفة.

لكن لها ميزات عديدة أهمها:

- جهد العمود أو الـ cell فيها عالى نسبيا (2 – 2.2 – 2.4) فولت وهذا يعتبر أعلى جهد يمكن أن نأخذه من البطاريات السائلة وبالتالى فإننا نحتاج إلى عدد قليل من الخلايا بالبطارية الواحدة.
- المقاومة الداخلية لها أقل
- يوجد بها ثبات للجهد أثناء التفريغ
- كفاءتها أعلى 60 فى المائة
- أرخص فى الثمن ويوجد تنوع كبير فى السعات الخاصة بها من 1 أمبير.ساعة إلى عدة آلاف من الامبير.ساعة
- لها أداء ممتاز فى درجات الحرارة المرتفعة
- يمكن بسهولة معرفة حالة الشحن سواء مشحونة أو مفرغة من خلال قياس كثافة المحلول.

16.2.5 عيوب وميزات البطارية القلوية

يعيب هذه البطاريات:

- الجهد للعمود أو الـ cell قليل لا يتعدى 1.2 فولت
- المقاومة الداخلية للعمود أعلى من الحامضيه
- أغلى فى الثمن
- كثافة المحلول لا تعطى مؤشرا لحالة الشحن.

لكن أهم ميزاتها:

- الصيانة أقل
- عمرها الافتراضى أعلى
- حجمها أقل
- أكثر أمانا

16.2.6 الشروط الواجب توافرها في غرفة البطاريات بمحطات الكهرباء :

ينتج من عملية شحن البطاريات غازات متصاعدة بالغرفة أهمها وأخطرها الهيدروجين القابل للانفجار إذا زادت نسبته فى الغرفة عن 14% ، لذلك يجب أن تتوفر في الغرفة ما يلي:

◄التهوية الجيدة بتركيب شفاط أو أكثر يطرد الهواء من داخل الغرفة للخارج

◄توضع مفاتيح الإنارة خارج الغرفة وأن كانت بالداخل يجب أن تكون من النوع ضد الانفجار (اى أنها معزولة تماما لعزل الشرارة الحادثة من التوصيل بملامسات المفتاح عند إنارة المصابيح بالغرفة لأنه من الطبيعي أنك ستضيء المصابيح بالغرفة قبل الدخول وربما ما يزال بالداخل غازات

◄الأرضية تكون من السيراميك الحراري و المقاوم للأحماض

◄يجب أن يتوفر بالحجرة حوض مياه و حنفية تعمل بالضغط سواء باليد أو بالقدم و يفضل أن تعمل بالقدم و ذلك في حالة الإصابة للوجه أو اليدين بالحمض أو القلوي تذهب إلى الحوض فورا و تضغط بالقدم على الدواسة لتخرج المياه من الحنفية (غالبا تكون حنفيتين موجهتين لأعلى و بزاوية بحيث تغطى المياه الخارجة جانبي الوجه) .

◄الباب لا يكون خشبيا بل معدنيا و يجب أن يفتح للخارج و ذلك لسهولة الخروج بسرعة في حالة حدوث خطر.

16.2.7 صيانة البطاريات :

يتم فحص البطاريات بشكل دوري كل ستة أشهر للتأكد من تمام عملها وعمل الدوائر المصاحبة لها وتتم عملية الصيانة بالخطوات التالية :

1- فحص واختبار السائل الإلكتروليتي للبطاريات شهريا وزيادة منسوب السائل عند انخفاضه بإضافة ماء مقطر ويتم اختبار درجة الحامضية عن طريق ميزان الكثافة (الهيدروميتر)
2- فحص ألواح البطاريات نصف سنويا لتجنب تراكم أملاح كبريتات الرصاص التي يصعب تحليلها ونزعها من الألواح
3- اختبار سعة وجهد البطاريات عن طريق قياس معدل التفريغ لها ومقارنته بسعة البطارية
4- شحن البطاريات بواسطة جهاز الشحن واستبدال البطاريات في حالة حدوث التملح الشديد

16.2.8 أعطال البطارية وكيفية إصلاحها :

هناك العديد من الأعطال لكن أبرز هذه الأعطال :

1- تملح الألواح ، والسبب في ذلك هو التفريغ السريع أو تركها غير مشحونة بدون استخدام فترة طويلة. وتملح الألواح يعنى تكون طبقة صلبة من الكبريتات تمنع إتمام التفاعل الكيماوى .وإذا كان التملح بسيطا فمن الممكن علاجه بشحن البطارية بتيار ضعيف يصل إلى عشر تيار الشحن العادى ثم تفريغها أيضا بنفس المعدل أما حالات التملح الشديد فلا علاج لها.
2- حدوث دوائر قصر بين الألواح ، ويحدث ذلك نتيجة للاتصال الداخلى بين الألواح الموجبة والسالبة، وعلاج ذلك يكون بغسل البطارية ثم شحنها، فإذا بقى القصر كما هو وجب تغييرها.
3- تلف البطارية نتيجة الشحن الزائد للبطارية والذى يؤدى إلى:

ا - زيادة كبيرة في كمية الماء المستهلكة في البطارية لأن الشحن الزائد يؤدى إلى زيادة درجة حرارة السائل وبالتالى إلى سرعة تبخره.

ب - زيادة التأكسد في الألواح الموجبة مما يؤدى إلى تمدد هذه الألواح.

ج - تملح الأطراف العلوية لألواح البطارية.

القسم الخامس بالمحطات

قسم الوقاية والتحكم

قسم التحكم فى أى محطة يمثل العقل المدبر للمحطة ، فتستطيع من خلاله فصل وتشغيل أى عنصر من عناصر المحطة . ويوجد نوعان من أنظمة التحكم فى المحطات :

- نوع فى المحطات القديمة نستعرضه سريعا.
- ونوع ثان فى المحطات الحديثة يعرف بالـ Distribution Control Center, DCC أو Substation Automation System, SAS . وهذا ندرسه بالتفصيل.

فنظام التحكم فى المحطات القديمة والتقليدية يتمثل فى مجموعات من الخلايا تتواجد فى غرفة التحكم الرئيسية بالمحطة كما فى الشكل 16-3 :

- المجموعة الأولى من هذه الخلايا يظهر عليها مخطط SLD لمهمات الجهد المرتفع (دوائر الدخول على المحطة والدوائر المتجه إلى جهة الجهد العالي فى المحول) وتظهر باللون الأزرق (جهد 132 ك) فى الصورة والتى يتضح منها أيضا أن نظام الـ BB الخاص بهذه المحطة من النوع Double BB .



Figure 16-3 غرفة التحكم فى المحطات التقليدية

- المجموعة الثانية من الخلايا (شكل 16–4) يظهر عليها مخطط مهمات الجهد المتوسط ، وتظهر باللون الأسود فى جهد الـ 11kV . (هذه صورة للمؤلف فى سنة 2005 أثناء تدريب ميدانى لطلبته بالكويت)



Figure 16-4

وفى كلا الحالتين نجد داخل هذه الخلايا مجموعات من الـ Contactors والـ Bush Button متصلة بالعناصر المختلفة بالمحطة عن طريق كابلات من أجل التحكم فى فصلها وتشغيلها. والدائرة الخاصة بكل Feeder فى الصور السابقة مزودة بأجهزة قياس وأجهزة تحكم وأجهزة وقاية ومبينات أعطال (فإذا حدث عطل فى عنصر ما فإن مبين العطل الخاص بهذا العنصر يظهر ذلك من خلال إضاءة لمبة أو تغيير لونه) ومن هنا سميت هذه الغرفة بغرفة التحكم لأنك تستطيع أن تعرف وأنت بها حالة كل كابل دخول/خروج وهل هو موصل أم مفصول وما هو الحمل عليه كما يمكنك فصله وتشغيله الخ. وإمكانيات هذا النظام القديم محدودة ولا تتعدى مذكرناه. أما الأنظمة الحديثة فى التحكم فنستعرضها فى جزء لاحق.

- المجموعة الثالثة من الخلايا الموجودة فى غرفة التحكم التقليدية تضم أجهزة الوقاية الخاصة بحماية مغذيات الجهد العالي دخول / خروج بالإضافة إلى أجهزة الوقاية الخاصة بالمحول. وبعض تفاصيلها فى جزء تالى بعد عرض منظومة التحكم الحديثة.

نظم التحكم الحديثة

(Substation Automation System)

نظم التحكم والوقاية فى محطات التحويل تطورت ومازالت تتطور بشكل مطرد خلال السنوات الأخيرة ، فقد تحولت نظم التحكم فى جميع المحطات الحديثة من نظم التحكم التقليدية (التى تعتمد على استخدام لوحات التحكم المزودة بمفاتيح يدوية Pushbuttons و Contactors متصلة بمهمات المحطة عن طريق كابلات) إلى نظم تحكم تعتمد على نظم الاتصالات الرقمية الحديثة. وتسمى هذه النظم بالـ Substation Automation Systems (SAS).

تمثل الـ SAS عصب التحكم والوقاية لجميع مهمات المحطة ، بل ويربط المحطة بنظام التحكم الإشرافى Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA).

ولا يقتصر دور الـ SAS على التحكم فقط ، بل يتم ربط جميع أجهزة الوقاية الرقمية والإنذارات والإشارات والبيانات الخاصة بكل مهمة فى المحطة ليتم عرضها والتحكم فيها من خلال أجهزة الحواسب المخصصة داخل غرفة التحكم. والشكل 16-5 يبين صورة من غرفة التحكم بإحدى محطات التحويل (قارن هذه الصورة وإمكاناتها بالصور الواردة فى الجزء السابق)



غرفة التحكم فى المحطات الحديثة Figure 16-5

وفيما يلى نعرض بشئ من التفصيل للمصطلحات ووظائف الهيكل العام لنظام الـ SAS.

16.2.9 وظـــــائف نظـــــــام الـ SAS

يشتمل نظام الـ SAS (شكل 16-6) على العناصر التالية:

- جهاز التحكم والمراقبة الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED).
- جهاز الوقاية الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Protection Intelligent Electronic Device
- نظام Software Electrical Interlocking لكل المهمات الكهربية بداخل وحدة التحكم للعنبر.
- أجهزة الحواسب المخصصة للتحكم والمراقبة لجميع المهمات الكهربية والمسماة بـ Human Machine Interface (HMI).
- وتنقسم أجهزة الـ HMI إلى Operator's Workstation (OWS) وEngineering Workstation (EWS).
- شبكتى اتصالات (Ethernet) منفصلتين تماما تشكلا Redundant Local Area Network (LAN). تتكون الـ LAN من Ethernet Switches, Routers, Gateways, Optical-Fiber Cables, and Modems.
- أجهزة طرفية Terminal devices مثل الطابعات و شاشات العرض و لوحات المفاتيح وغيرها.
- نظام تزامن (GPS) Global Positioning System لربط جميع أجهزة الوقاية والتحكم بزمن موحد على مستوى الشبكة ككل.
- نظام تسجيل الأحداث التتابعى Sequential Event Recorder (SER) لتسجيل كل الأحداث والإشارات مثل فتح أو غلق أى دائرة و عمل أى جهاز من أجهزة الوقاية. ويتم طباعة هذه التقارير بشكل مستمر على طباعات مخصصة.
- نظام تسجيل الإنذارات Annunciation لتسجيل كل الإنذارات الحادثة مثل حدوث عطل فى أجهزة الوقاية أو انقطاع التغذية عنها أو حدوث أعطال وغيرها.
- أجهزة تسجيل الأعطال Transient Fault Recorder (TFR) والتى تقوم بتسجيل قيم الجهد والتيار بالإضافة إلى بعض الإشارات الرقمية الصادرة من أجهزة الوقاية بعد حدوث العطل. يتم الإحتفاظ بهذه البيانات لتحليلها بعد ذلك لمعرفة أسباب وملابسات العطل.
- تشتمل أيضا نظم الـ SAS على الوسائل اللازمة لربط المحطة بالـ SCADA.

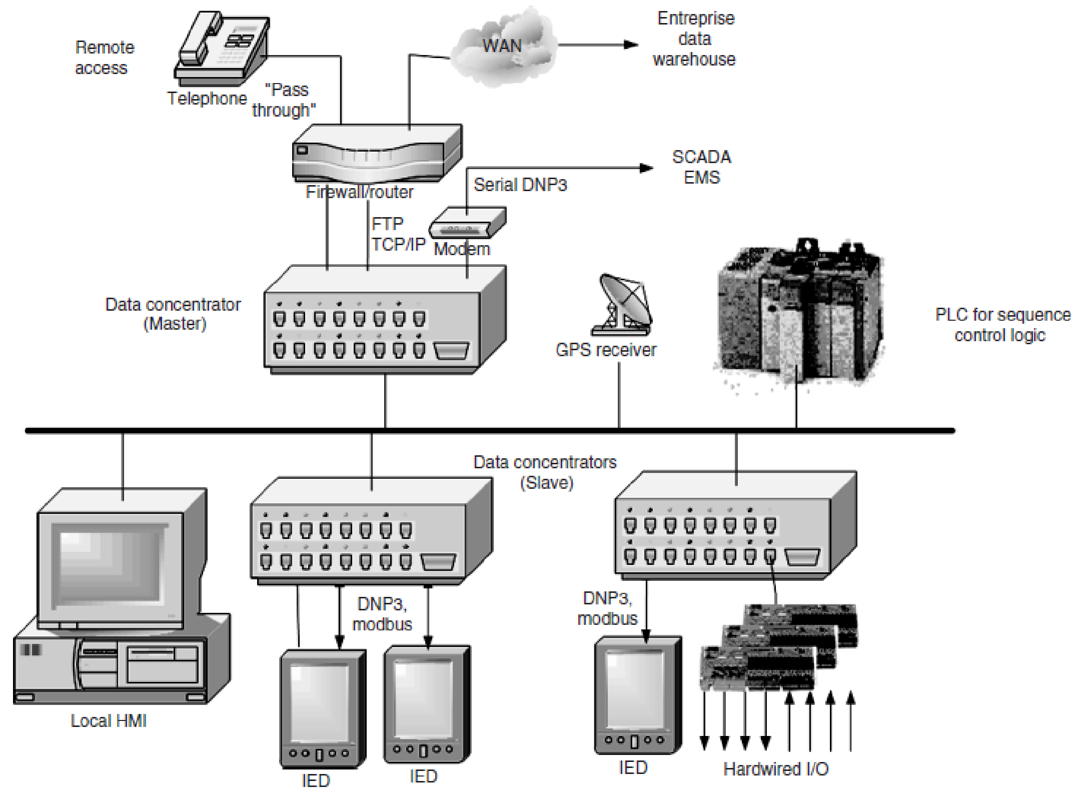


Figure 16-16-6 SAS

والشكل 16–7 يمثل الشكل العام لنظام الـ SAS.

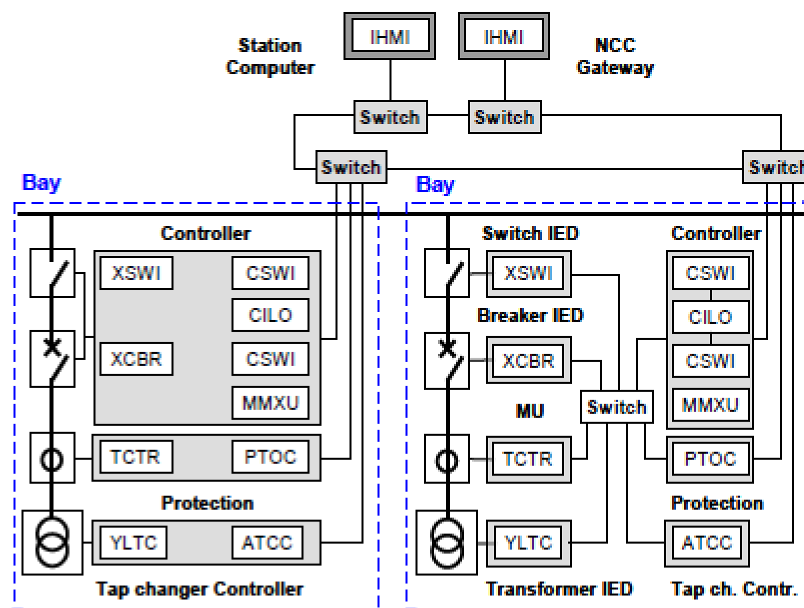


Figure 16-7 SAS

16.2.10مقارنة بين التحكم فى المحطات التقليدية والمحطات الحديثة

لنأخذ مثالا بسيطا لنبين به مدى التوفير ومقدار رفع الكفاءة وقدر التقليل فى تكاليف التشغيل والصيانة فى المحطات الحديثة مقارنة بالمحطات التقليدية.

فى المحطة التقليدية يكون لكل معدة كهربائية سواء كانت (مغذى – محول – رابط القضبان) عدد ثلاث خلايا فى مبنى التحكم للمحطة:

1- خلية وقاية
2- خلية تشغيل ومراقبة
3- خلية قياس ومراقبة

كذلك تركب أجهزة وحدات طرفية Remote Terminal Unit RTU لتجميع المعلومات من معدات المحطة وتبادل تلك المعلومات مع مراكز التحكم، والـ RTU عبارة عن جهاز الكتروني ذكي يمكن تركيبه في مكان بعيد لكي يعمل كنقطة نهاية للـ field contact ويستخدم زوج من الوصلات النحاسية لكي يشعر ويراقب كل contact & transducer ومنها أنواع توضع في مراكز التحكم كأجهزة إرسال وإستقبال للإشارات ، و منها ما يوضع في المحطات.

أما فى المحطات الحديثة فقد تجمعت كل تلك الوظائف في جهاز الوقاية الرقمي IED ، اذ أنه يؤدى مهمة الوقاية وكذلك يؤدى مهمة القياس للفولت والتيار ويحسب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ويمكنه حساب أى معلومة أخرى بدلالة الجهد والتيار وزاوية الطور بينهما والزمن مثل احتساب استهلاك الطاقة. كذلك يؤدى مهام التشغيل للمعدة من فصل وتوصيل القاطع الكهربى وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى.

وفى المحطات التقليدية سواء كانت AIS أو GIS فإنه يلزم كمية كبيرة من الكابلات للربط بينها وبين غرفة التحكم للمحطة ، وهذه الكابلات تستخدم لتوصيل خلايا التشغيل وخلايا المراقبة وخلايا الوقاية لكل معدة كهربائية بمعدات الفصل والتوصيل ومعدات استشعار الجهد (محول الجهد) ومعدات استشعار التيار (محول التيار).

فعلى سبيل المثال لا الحصر يوصل من القاطع الكهربى عددا من الملامسات المساعدة (Auxiliary contacts) لخلايا التشغيل منها ملامس لبيان حالة القاطع (موصل أو مفصول) ، وعدد آخر من الـ Contacts تستخدم كشرط لإمكانية توصيل أو منع التوصيل (Interlock) للقاطع الكهربى والسكاكين التي لها علاقة به ، وعدد آخر من الـ Contacts لخلايا أجهزة الوقاية اللازمة للقيام بمهمة الوقاية. ونفس العدد من الـ Contacts أو أكثر لكل سكينة توصيل وكل سكينة أرضي لنفس الوظائف ، كذلك يوصل من محولات التيار كابلات لتوصيل الملفات الثانوية إلى خلايا أجهزة الوقاية وخلايا القياس والمراقبة وأيضا كابلات لتوصيل الملفات الثانوية لمحولات الجهد إلى نفس الخلايا.

كذلك يتم توصيل كابلات تخص التشغيل من غرفة التحكم لإتمام عملية التوصيل والفصل سواء العادي أو نتيجة لحدوث خطأ. و يلاحظ أن كمية الكابلات المطلوبة هائلة حتى يمكن التشغيل والتحكم من غرفة تحكم المحطة.

أما فى المحطات الذكية فالوضع يختلف تماما لسببين:

- أولا : تركب أجهزة الوقاية الرقمية إما فى السويتشجير مباشرة أو فى غرفة أقرب ما تكون إليها وفى هذه الحالة فإن طول الكابلات سوف يكون قليلا جدا بالمقارنة بتوصيلها إلى غرة التحكم
- ثانيا : يتم توصيل ملامس مساعد واحد أو اثنين على أكثر من كل من القاطع الكهربائي وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى وكذلك ثلاثة أو اربعة أسلاك توصل من الملفات الثانوية من محولات الجهد وأخرى من محولات والتيار إلى أجهزة الوقاية الرقمية مرة واحدة وفى هذه الحالة فإن كمية الكابلات سوف تكون قليلة جدا بالمقارنة بالنظام التقليدي .

وبالتالى فقد أدت نظم الـSAS إلى كثير من المميزات مقارنة بنظم التحكم التقليدية أهمها كما ذكرنا توفير عدد كبير من كابلات التحكم حيث تم إستبدالها ببرامج وخوارزمات تكتب داخل أجهزة الـ IEDs. وهذا بدوره يؤدى إلى قلة احتمالية حدوث أعطال أو قطع فى شبكات كابلات التحكم داخل المحطة وبالتالى زيادة نسبة الاعتمادية لنظم التحكم والوقاية.

وفى الجزء التالى نتعرف على الهيكل الهرمى لنظام التحكم وآليات تنفيذه بشكل مبسط.

16.2.11هيكل التحكم فى نظام الـ SAS

ينقسم هيكل التحكم فى نظام الـSAS إلى خمسة مستويات:

OFF Mode

وفيه لا يمكن التحكم فى المهمة الكهربية الخاصة بالعنبر من أى مستوى سواءا من داخل أو خارج المحطة.

Emergency Mode

وفيه يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق أجهزة التحكم اليدوية الموجودة فى العنبر ذاته كما هو الحال فى المحطات ذات نظم التحكم التقليدية. ويستخدم هذا النمط من انماط التحكم فى حالة حدوث أعطال أو صيانة فى كل أو بعض من أجهزة نظام الـ SAS.

Local (BCU) Mode

وفى هذا النمط يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق الـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED).

Remote (Station Level) Mode

وفيه يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق أجهزة الحواسب سواءا الـ Operator's Workstations (OWS) أو الـ Engineering Workstations (EWS). ومن الجدير بالذكر أن الأوامر التى يتم إصدارها من الـ OWS أو الـ EWS تنتقل عبر شبكة الاتصالات (LAN) إلى الـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED) والتى تقوم بدورها بتمرير الأوامر إلى المهمات الكهربية من خلال أسلاك التوصيل.

Remote (Supervisory Level) Mode

وفى هذا النمط يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق نظام الـ SCADA من خلال مراكز التحكم الأقليمية والقومية. وكما هو الحال فى النمط السابق، فإن الأوامر التى يتم إصدارها من الـ OWS أو الـ EWS تنتقل عبر شبكة الاتصالات (WAN and LAN) إلى الـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED)). والشكل 16-8 يلخص هيكل التحكم الهرمى فى نظام الـ SAS.

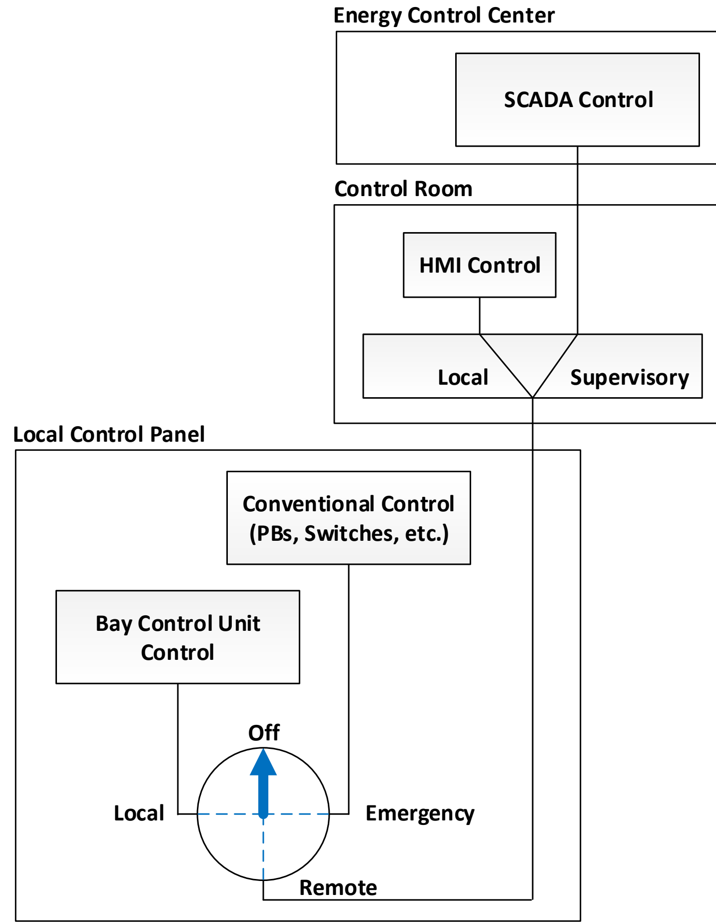


Figure 16-8

هيكل التحكم الهرمى فى نظام الـ SAS

وبعد التعرف بشكل مبسط على الهيكل العام لأنماط التحكم فى نظام الـ SAS ، يجدر ذكر أن اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) قامت بوضع مواصفة عالمية تضبط تصميم ونمذجة نظم الإتصال داخل شبكات نظام الـ SAS تحت مواصفة رقم IEC–61850.

منظومات الـوقاية الكهربية فى محطات التحويل

Protective Schemes

توجد داخل محطات التحويل جميع أجهزة الوقاية الخاصة بحماية عناصر الشبكة الكهربية مثل خطوط النقل والمحولات وقضبان التوزيع والـ Reactors وخلافه.

وكل عنصر من هذه العناصر له منظومة حماية تتكون من عدة أجهزة وقاية بالإضافة إلى القواطع وأجهزة الـ CT and VT الخاصة بهذا العنصر. وكل هذه المنظومة توضع داخل محطات التحويل فى غرفة التحكم كما فى الصورة شكل 16-9.

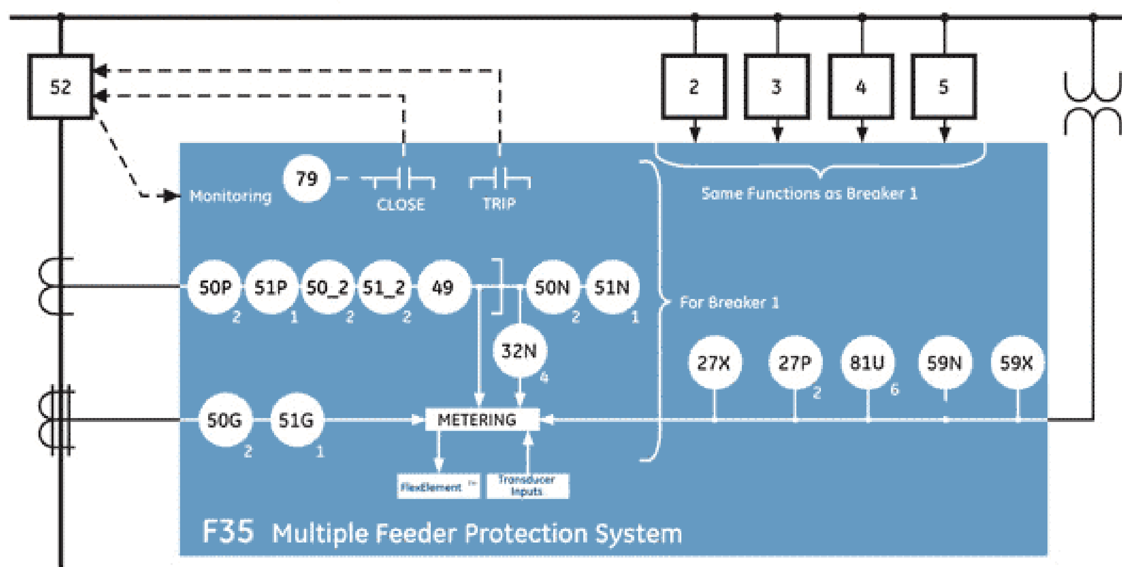


Figure 16-9 Digital Relays

وفى هذا الجزء لن نشرح أداء هذه المنظومة ولن نشرح مكوناتها فهذا يمكن الرجوع إليه فى كتاب نظم الحماية الكهربية ، وسنكتفى فقط بوضع نموذجين لمخططات منظومة الوقاية لأحد المغذيات (شكل 16-7) ، ومنظومة الوقاية للمحول (شكل 16-8) ، حيث يظهر على المخطط فقط أرقام أجهزة الوقاية المستخدمة فى حماية هذا العنصر . والأمثلة مأخوذة من كتالوج إحدى الشركات المصنعة لأجهزة الوقاية الرقمية.

16.2.12نموذج لمنظومة حماية أحد المغذيات

The F35 feeder protection system provides feeder protection, control, monitoring and metering in an integrated, economical, and compact package.



ANSI Device Numbers & Functions

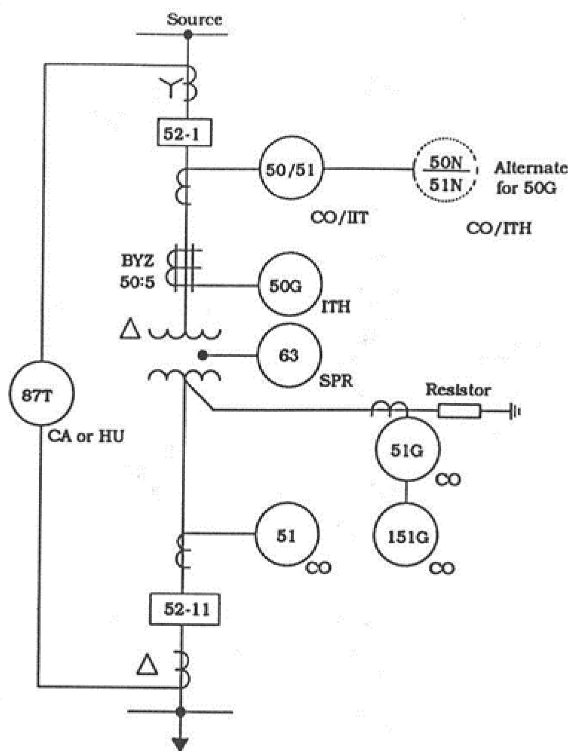
Device Number	Function	Device Number	Function
27P	Phase Undervoltage	51N	Neutral Time Overcurrent
27X	Auxiliary Undervoltage	51P	Phase Time Overcurrent
32N	Wattmettric Zero Squence Directional	51_2	Negative Sequence Time Overcurrent
49	Thermal Overload	52	AC Circuit Breaker
50G	Ground Instantaneous Overcurrent	59N	Neutral Overvoltage
50N	Neutral Instantaneous Overcurrent	59X	Auxiliary Overvoltage
50P	Phase Instantaneous Overcurrent	79	Automatic Recloser
50_2	Negative Sequence Instantaneous Overcurrent	81	Underfrequency
51G	Ground Time Overcurrent		

Figure 16-7 Feeder Protective Scheme

16.2.13نموذج لمنظومة حماية المحول

The T60 transformer protection system is a comprehensive three-phase transformer relay designed to protect medium and large power transformers.

- Dual-slope, dual-breakpoint differential restraint characteristic, restrained and unrestrained differential
- 2nd harmonic inrush and overexcitation inhibit
- Transformer overexcitation protection
- Restricted ground fault
- Loss-of-life, aging factor, hottest spot
- Five zones backup distance protection with power swing detection and load encroachment function
- Synchrocheck, ROCOF, over and under frequency



ANSI Device Numbers & Functions

Device Number	Function
21P	Phase Distance
21G	Ground Distance
24	Volts Per Hertz
25	Synchrocheck
27P	Phase Undervoltage
27X	Auxiliary Undervoltage
49	Thermal Overload
50BF	Breaker Failure
50G	Ground Instantaneous Overcurrent
50N	Neutral Instantaneous Overcurrent
50P	Phase Instantaneous Overcurrent
50/87	Instantaneous Differential Overcurrent
51G	Ground Time Overcurrent
51N	Neutral Time Overcurrent
51P	Phase Time Overcurrent
59N	Neutral Overvoltage
59P	Phase Overvoltage
59X	Auxiliary Overvoltage
67N	Neutral Directional Overcurrent
67P	Phase Directional Overcurrent
68	Power Swing Blocking
78	Out-of-Step Tripping
81O	Overfrequency
81U	Underfrequency
81R	Rate of Change of Frequency (ROCOF)
87G	Restricted Ground Fault
87T	Transformer Differential

Figure 16-8 Transformer Protective Scheme

القسم السادس بالمحطات

وسائل الاتصالات بمحطات التحويل

تعتبر الاتصالات وسيطا لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، و نلاحظ أن أجهزة الاتصال جزء منها في المحطات والجزء الآخر في مركز توزيع الأحمال.

وتنقسم وسائط الاتصال المختلفة المستخدمة للربط بين المحطات إلى عدة وسائط أهمها:

16.2.14 الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC

ولكى يمكن استخدام هذه الطريقة وتسمى Power Line Carrier, PLC في نقل المعلومات لابد من توفر جهاز PLC في المحطة وآخر في المركز ، حيث يتم استقبال المعلومات المختلفة القادمة من وحدة RTU على شكل إشارات رقمية (Digital) بواسطة جهاز Modem ، وهذا الجهاز يقوم بتحويلها إلى إشارات (Analog) ذات تردد منخفض يعرف بالتردد الصوتي (Voice Frequency, VF) كمرحلة أولى ، ثم يقوم بعد ذلك بتمريرها إلى الـ PLC من خلال كرت داخل هذا الجهاز يُعدَل تردد الموجة إلى تردد متوسط (Intermidiate Frequency, IF)، ثم في المرحلة النهائية يتم تعديل تردد الموجة إلى التردد العالي (HF) المراد إرسالها عليه .

وفى الجزء الأخير من هذه العملية يتم تكبير الإشارة وإعطائها كمية من الطاقة بواسطة Power Amplifier ، حتى يمكن إرسالها على خطوط الجهد العالي (500 ك.ف أو 220 ك.ف) الموجودة على البرج ، مع ملاحظة أنه لن يحصل تداخل بين المعلومات المتعلقة بالاتصالات وبين الطاقة المنقولة على نفس الخط وذلك لأن تردد الشبكة هو (50 هيرتز) بينما تردد الاتصالات يكون ما بين (20 إلى500 كيلوهيرتز) .

ونلاحظ أن تعديل الموجة تم على مراحل ، وذلك لكي لا يحصل تشوه كبير في الموجة أثناء التعديل من خلال مرحلة واحدة وبالتإلى لا نفقد أية معلومات.

ما أن تصل الموجات المرسلة على خطوط الجهد العالي إلى محطة أخرى أو إلى مركز تحكم LDC حتى يستقبلها صائد الموجات Wave Trap حيث يعمل صائد الموجات على التقاط موجات الاتصالات من خط القوى و تمريرها إلى داخل المركز حيث يكون في استقبالها جهاز PLC الثانى الذى يعمل على تعديل تردد الموجة من التردد العالي (HF) إلى التردد المتوسط (IF) ، ثم تعديل التردد المتوسط إلى الصوتي (VF) ، ثم يقوم بتمريرها إلى جهاز Modem يقوم بإزالة تضمين الموجة وتحويلها من Analog إلى Digital ، ومن ثم تحويلها إلى جهاز TCI الذي يقوم بمعالجتها وإرسالها إلى أجهزة الحاسب الإلى .

وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بعدم وجود تمديدات وأسلاك خاصة بالاتصالات لأن النقل يتم من خلال خطوط الضغط العالي الممددة أصلاً لنقل الطاقة.

نلاحظ أن البيانات و المعلومات سواء كانت مُرسلة أو مُستقبلة يتم نقلها على نفس الخط ولكن بتردد مختلف لكي لا يحصل بينها تداخل .كما يقوم الجهاز بتشغيل قناة واحدة إذا كانت المعلومات التي يتعامل معها قليلة أو قناتين عند كثرة المعلومات.

16.2.15دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap

وهذه تكون فى مدخل المحطة ومن أوائل المكونات فيها ، وتكون موصلة على التوالي مع موصلات خط الدخول وهى عبارة عن Inductor بقيم تيار مقننة عالية تصل إلى 2000 أمبير وتكون الـ Inductance مابين 0.1- 2 mH ، والغرض منها استقبال الإشارات القادمة من المحطات الأخرى الخارجية ، وهى عادة إشارت خاصة بأجهزة الوقاية غالبا أو إشارات من مركز التحكم بغرض فصل وتوصيل خطوط أو محولات بالمحطة فتسمح هذه الدوائر بمرور التيارات ذات التردد 50 هيرتز وتحجز الترددات العالية فى دائرة أخرى متصلة بجهاز الاستقبال Receiver. وتظهر دائما كاسطوانات معلقة كما فى الشكل 16–9. وتوصل مصيدة الذبذبات على التوالي مع خط الضغط العالي وتوصل فى الغالب على فازة واحدة فقط .



Figure 16-10 Wave Traps

ملحوظة:

هذه الترددات العالية تكون بالطبع أعلى من الترددات (العالية) التى يمكن أن تتواجد فى الإشارة أثناء العطل وتكون غالبا فى مدى 4 إلى 11 ميجا هيرتز وهذا المدى لا يظهر فى إشارات الأعطال.

وتعتمد فكرة عمل هذه المعدات على كونها (RLC circuits) و يتم ضبط Resonance Frequncy للـ Line Trap بحيث تصبح معاوقتها عند الـ 50 Hz تساوى صفر وبالتالى تقوم بإمرار تردد الشبكة 50– Hz مع تحقيقها لمعاوقة كبيرة لمرور الترددات المرتفعة والتى تجد الـ Coupling Capacitor معاوقته صغيرة جدا فتدخل من

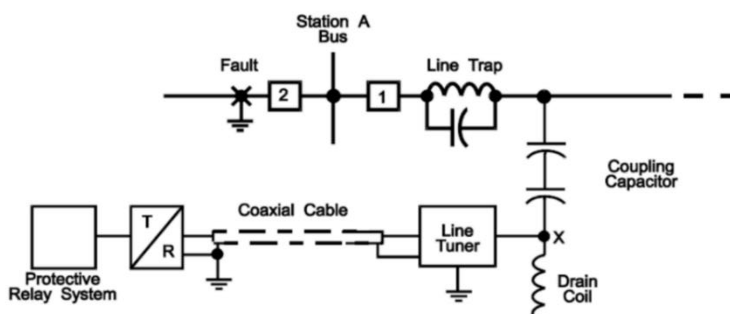


Figure 16-11 مكونات مصيدة الموجات

خلاله إلى جهاز الاستقبال عبر الـ Line Tuner كما فى الشكل 16-10.

16.2.16الاتصالات عن طريق : Pilot Cable

وتعرف أيضا بالكابلات الأرضية ، وذلك لأنها عبارة عن كابلات خاصة بالاتصالات يتم تمديدها تحت الأرض بين المحطات و بين الـ LDC.
و يتم تركيب جهاز Modem في المحطات بحيث يستقبل الإشارات الرقمية القادمة من RTU ثم يقوم بتحويلها إلى Analog ، ثم منه إلى Pilot Cable الذي ينقلها بدوره إلى المركز ، حيث يستقبلها جهاز Modem آخر يقوم بتحويلها من Analog إلى Digital ومنه إلى Tag Control Information, TCI

16.2.17الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO

يتم تمديد الألياف البصرية بين المحطات المختلفة و مركز توزيع الأحمال وذلك بحيث تحتوي المحطات على أجهزة خاصة بالاتصال عن طريق الألياف البصرية وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بكونها سريعة جداً وتنقل كمية كبيرة من البيانات وقليلة الأعطال نوعاً ما.
و يستقبل جهاز (FO) الإشارات الرقمية من الـ RTU و من أجهزة أخرى حتى وإن كانت Analog ، ثم يقوم بتحويلها إلى إشارات ضوئية وإرسالها من خلال الألياف البصرية إلى المركز حيث يكون في استقبالها جهاز آخر يقوم بتحويل الإشارات الضوئية إلى Digital أو Analog ومن ثم نقلها إلى. TCI

16.2.18الاتصالات اللاسلكية : Wireless

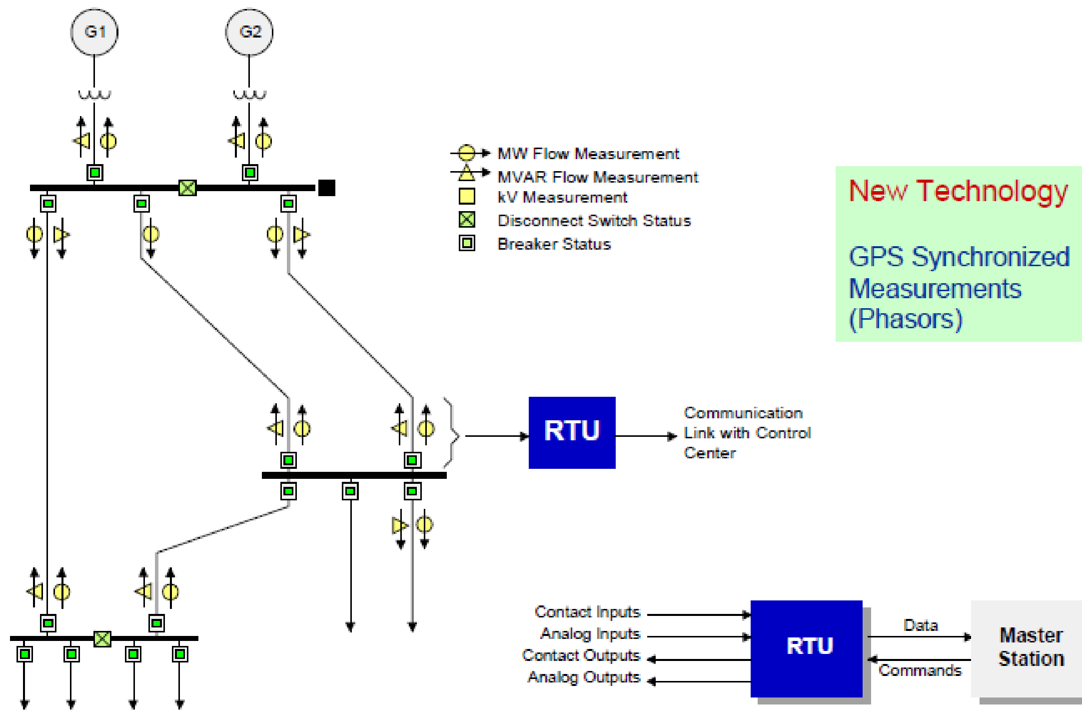
وتتكون شبكة الاتصالات اللاسلكية من عدة أجهزة أهمها:

1- الأبراج: Towers
تعتبر الأبراج ذات أهمية قصوى في أي شبكة لاسلكي فهي تحمل هوائيات الاتصال ، ويتم توزيع الأبراج بشكل مدروس لكي تشمل جميع المناطق المراد تغطيتها بالشبكة. وأهم عيوب هذه الوسيلة أن هوائيات الأبراج لابد أن تكون فى مدى الـ Line of Sight بمعنى أن ترى بعضها بعضا ، وهذا هو السبب فى أن أبراج الاتصالات دائما تكون مرتفعة أو فوق مبانى مرتفعة. وإلا ستضعف الإشارة ونحتاج إلى المكبرات أو الـ Repeaters .

2- جهاز . Repeater
يقوم هذا الجهاز باستقبال الإشارات من الأجهزة اللاسلكية المختلفة ثم يقوم بتكبيرها (أي تكبير ترددها) وإعادة إرسالها مرة أخرى ، وذلك لكي تنتقل الإشارات إلى مسافات بعيدة وبالتإلى يكون نطاق عمل اللاسلكي أكبر .
ويتحكم الجهاز في (6) قنوات كحد أقصى ويقوم بتشغيلها وتكون هذه القنوات على ترددات مختلفة لكي لا

يحصل بينها تداخل. ويتم تغذيته بتيار متردد AC ، وفي حالة انقطاع هذا المصدر توجد بطارياتDC تعمل فور انقطاع المصدر الأصلي وذلك لضمان استمرار خدمة اللاسلكي على الدوام.

نشير هنا إلى أنه عند توصيل وتمديد أحد الطرق السابقة لا يتم ذلك مباشرة من كل محطة إلى المركز بالضرورة ، بل قد يمر الخط بعدة محطات في طريقه قبل أن يصل إلى المركز حاملاً معه بيانات كل محطة على حدة لإيصالها إلى المركز أو العكس.



القسم السابع بالمحطات

نظم الوقاية من الحريق فى المحطات

الغرض من نظام الإطفاء هو حماية العاملين والمعدات والأجهزة من الحريق . وكما نعلم فإنه لكي يحدث الإشتعال فلابد من توافر المادة والحرارة والأوكسجين (مثلث الحريق شكل (16–11) ، وذلك في مكان واحد وزمان واحد .

و نظام الوقاية من الحريق الذي نحن بصدده يتضمن النظام الثابت ولا نقصد أنظمة الوقاية المحمولة (الطفايات) .



Figure 16-12

16.3 مصادر الخطورة فى المحطات

حدوث حريق بالمحطة غالبا يكون بسبب من الأسباب التالية:

- الكابلات هي مصدر الخطورة الأساسي في المحطات الكهربية حيث يمثل مزيج من المواد القابلة للاشتعال ومصدر للشرارة ، حدوث خطأ في أحد الكابلات يمكن أن يسبب درجة كافية لاشعال العازل واحداث حريق.
- ومن مصادر الخطورة أيضا الأجهزة المعزولة بالزيت كالمحول أو قاطع الدائرة في قابلية الزيت للاشتعال عند حدوث خطأ كهربي داخل الجهاز ، كما يعتبر تسرب الماء داخل الأجهزة أو حدوث خطأ في الجسم العازل من أسباب حدوث الشرارة وحدوث الحريق.
- ومن مصادر الخطورة في بعض المحطات الكهربية مولدات الديزل وضاغط الهواء لما تحتويه من مواد قابلة للاشتعال مع الشرارة.

16.3.1 نظرية الإطفاء

تعتمد فكرة نظرية إطفاء الحريق بمحطات المحولات على إفساد نسبة الأكسجين عند بدء الاشتعال وذلك :

1- باستخدام مادة مخمدة ، مثل غاز ثاني أكسيد الكربون ، أو بخار الماء (أو رذاذ المياه) ، مما يقلل نسبة الأكسجين عن الحد اللازم لاستمرار الاشتعال (حوالي 10 %) وكذلك يسبب إزاحة الأكسجين عن الجسم المحترق . بسبب اختلاف كثافة المادة المخمدة والهواء مما يؤدى إلى توقف الاشتعال.

2- أحكام إغلاق جميع الفتحات والأبواب في الغرفة التي بها الحريق ، بحيث لا يسمح بدخول الهواء إليها ، وغالبا تترك فتحات صغيرة علوية لخروج الهواء.

16.4 مكونات نظام الإطفاءالثابت:

نظام الاطفاء عبارة عن نظام يركب فى المواقع المراد حمايتها ويعمل تلقائيا. ويتكون من واحد أو أكثر من الأنظمة التالية:

- أنظمة المرشات المائية
- أنظمة ثاني أكسيد الكربون
- أنظمة الهالون وبدائله.

ولكل واحد منها ميزاته وعيوبه.

ويتكون كل نظام إطفاء من:

- عنصر الإطفاء
- صمام التحكم
- نظام التوزيع
- أجهزة الكشف والتحكم
- صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (deluge valves) ،
- بالإضافة إلى مواسير قادرة على إيصال عنصر الإطفاء (ماء/CO_2) بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان الحريق كما فى الشكل 16-12.

عنصر الإطفاء :

يمكن أن يكون هذا العنصر ماء مخزن فى خزان للمياه أو من أى مصدر طبيعى للماء . ويستخدم في بعض المحطات نظام ثاني أكسيد الكربون.

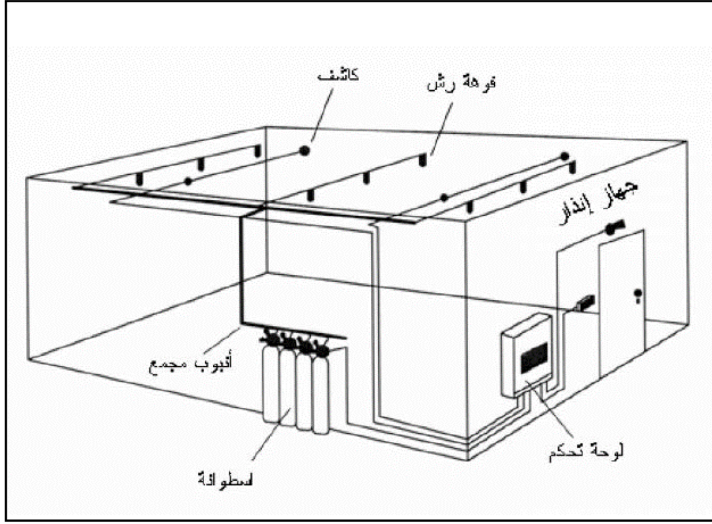


Figure 16-13 مكونات نظام الاطفاء الثابت

صمام التحكم :

صمامات التحكم النموذجية هي
صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (Deluge valves) .

نظام التوزيع :

يتكون من مواسير ومنافذ قادرة على إيصال عنصر الإطفاء بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان الحريق.

أجهزة التحكم و الكشف عن الحريق :

هي عبارة عن أجهزة كهروميكانيكية مجهزة بحساسات (sensors) قادرة على اكتشاف الحريق في مراحل مبكرة جداً ، أى فى بداياته وإرسال إشارات إلى أجهزة الإنذار والتحكم تشغيل في نظام الإطفاء.

16.4.1 آلية الإطفاء

يتم إطفاء الحريق أما يدويا (طفايات) أو آليا ، وسوف نتحدث في هذا الجزء عن إطفاء الحريق آليا ، حيث تعتمد الفكرة الأساسية على تركيب رؤوس مكتشفة للارتفاع في درجة الحرارة المحيطة بالمحول ، وعند وصولها إلى الحد الخطر تبدأ في إعطاء إشارة بوجود حريق ، كما تعمل في نفس الوقت على إطلاق الوسط الذي سيتم إطفاء الحريق به ، ويختلف هذا الوسط على حسب نوع تركيب المحول ، هل هو داخل المبنى أو خارجه.

فإذا كان المحول مركبا داخل المبنى يتم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون وهو يمتاز بأنه غاز خامل لا يساعد على الاشتعال ، ولا يشتعل وأثقل من الهواء ، كما يمكن استخدام الهالون ، وهو غاز لا يساعد على التآكل وغير موصل ، يقوم إذا ما تواجد بتركيز يبلغ حجمه 5% بإطفاء الحريق بواسطة تفاعل كيماوى ، حيث يتفاعل مع ناتج الاحتراق المسئول من انتشار اللهب بسرعة ، كما ينهى التفاعل المتسلسل للاحتراق ، ويتميز غاز الهالون بأنهأسرع فى إطفاء الحريق من غاز ثاني أكسيد الكربون.

أما إذا كان المحول مركبا خارج المبنى أو في حجرات غير مقفلة من جميع الجوانب ، فإنه يتم استخدام مياه مدفوعة تحت ضغط ، وغالبا تكون مثل الرذاذ ، فيؤدى استخدامها إلى خفض درجة حرارة المحول المشتعل عن درجة حرارة اشتعاله ، نتيجة مشاركة واقتسام المياه للحرارة المتولدة عن الحريق.

16.5 أنواع أنظمة إطفاء الحريق

16.5.1 الماء تحت ضغط الهواء

في محطات المحولات نستخدم هذا النظام الشائع لحماية المواقع التي بها محولات مملوءة بالزيت ، فى هذا النظام يستخدم كمية كبيرة من الماء المخزن في خزانات خاصة تحت ضغط لإطفاء الحريق وهذا الماء يدفع إلى الـ Sprinklers بمساعدة الهواء المضغوط. أيضا يستخدم الهواء المضغوط للكشف عن الحرائق وللتحكم في خروج الماء إلى المكان الذي به الحريق.

من مميزات هذا النظام أنه من السهل إعادته إلى الخدمة بسرعة بعد إطفاء الحريق وأيضا رخص ثمن المادة المستخدمة في الإطفاء وهى (الماء)

ومن عيوب هذا النظام تعرض الخزان للصدأ . وفى حالة عدم إخماد الحريق واستنفاذ كمية الماء الموجودة في الخزان فإن الهواء المندفع من النظام يساعد على زيادة الحريق.

16.5.2 نظام ثاني أكسيد الكربون


Figure 16-14 اسطوانات ثانى أكسيد الكربون

نظام مكافحة الحريق باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون ذو تأثير فعال في إطفاء الحرائق دون ترك آثار ضارة بالمعدات الموجودة. يتميز غاز ثاني أكسيد الكربون أنه لا يشتعل ولا يساعد على الإشتعال ، وأنه أثقل من الهواء بحوالي مرة ونصف ، فيتراكم على سطح المواد المشتعلة مانعا وصول أكسجين الهواء لمصدر النار. وحيث أن درجة حرارة غاز CO_2 منخفضة جدا ، وبالتالى فإنه يعمل على تبريد المادة المشتعلة

كمية الغاز المستخدمة لإطفاء الحريق تعتمد على حجم المكان أو الحجرة الموجود بها المحول ، فيحتاج كل متر مكعب إلى 2 كجم من غاز ثاني أكسيد الكربون.

ويخزن ثاني أكسيد الكربون في اسطوانات مضغوطة كما فى الشكل 16–13 ، وتستخدم اسطوانة صغيرة من ثاني أكسيد الكربون لنتحكم في تمرير ثاني أكسيد الكربون من الاسطوانات الكبيرة.

من عيوب هذا النظام في حالة حدوث تسريب للغاز داخل الحجرة فيمكن أن يؤدي ذلك إلى حدوث اختناق للأفراد

ملحوظة:

عند تفريغ غاز CO_2 يجب أن تغلق جميع الأبواب و الشبابيك ولكن تترك فتحات في أعلى الحجرة لخروج الهواء كما يجب تشغيل إنذار صوتى (يعمل أتوماتيكيا عند حدوث الحريق) لتنبيه العاملين بحدوث حريق .

يلاحظ أنه يوجد تأخير زمنى (من 1–24 ثانية) من لحظة تشغيل الإنذار ، وحتى انطلاق الغاز لكي يمكن إخلاء المكان من الأشخاص وغلق الأبواب . وبعد انتهاء إطفاء الحريق يجب مراعاة عدم دخول غرفة المحول قبل عمل التهوية الكافية .

16.5.3 نظام الماء تحت ضغط ثاني إكسيد الكربون

هذا النظام يشبه نظام الماء تحت ضغط الهواء ولكن تم استبدل الهواء المضغوط بثاني أكسيد الكربون لدفع الماء من الخزان خلال المواسير إلى الرشاشات الرزاز يه . وغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدم يخزن في اسطوانتين أو أكثر , ويستخدم نظامان للكشف عن الحريق ، ولكي يمر الغاز من الاسطوانة الكبيرة ويخرج الماء لابد من أن يعمل كلا من نظامي الكشف معا وفى حالة عدم شعور أحدهما بالحريق فلن يعمل النظام.

من مميزات هذا النظام عدم صدأ الخزان , وإذا لم تتم عملية الإطفاء بعد انتهاء كمية الماء فإن الغاز الذي يخرج بعد الماء لا يزيد من الإشتعال كما في حالة الهواء.

لكن من عيوب هذا النظام أنه في حالة عدم وجود اسطوانات احتياطية أو استبدال الاسطوانات الفارغة بسرعة بعد عملية التشغيل سوف يكون المكان المراد حمايته بدون حماية بالإضافة إلى أن غاز ثاني أكسيد الكربون غالى الثمن.

16.5.4 نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول:



Figure 16-15

توضع الرشاشات حول المحول (شكل 16-14) وهذه الرشاشات مثبتة على مجموعة من المواسير تحيط بالمحول الأمر الذي يجعل الماء الخارج منها يغمر المحول من جميع الجوانب وعندما يشعر الحساس بحرارة الحريق فإن مفتاح الضغط يرسل إشارة ليعمل جهاز الإنذار بغرفة التحكم . وفي نفس الوقت يتم فتح صمام التحكم عن بعد آليا خلال ثواني ويبدأ في إطفاء الحريق .

وبما أن الماء أهم عامل مؤثر في عملية الحريق لذلك فإن الماء لابد أن يكون مجهزا طوال الوقت بالكمية المناسبة وبالضغط المناسب . لذلك لا نستطيع أن نضع نظام وقاية الحريق على مصدر المياه التابع لمرفق مياه المدينة ، ولكن يجب وجود خزان مياه كبير مملوء بالماء ومزود بضاغط هواء (يصل ضغط الهواء من 10-15 بار داخل خزان المياه) وذلك من أجل أن يخرج الماء على شكل غمامة فيساهم أيضا فى خنق الحريق).

الباب الرابع

منظومة التوزيع الكهربية

(DISTRIBUTION SYSTEM)

17

ملامح تخطيط شبكات التوزيع

17.1 مقدمة

يطلق مصطلح "منظومة التوزيع الكهربية" على كلا من شبكتى الجهد المتوسط والجهد المنخفض .

فأما قيم الجهد المتوسط فهى : 3.3 kV – 6.6 kV – 11 kV – 22 kV – 33 kV

وأما قيمة الجهد المنخفض فهو 400 فولت فى معظم الدول ، أما فى أمريكا فهى 220 فولت.

و**<u>منظومة التوزيع للجهد المتوسط</u>** يقصد بها شبكة المغذيات الأولية (PRIMARY DISTRIBUTION)، و هي التي تنقل القدرة من المحطات الرئيسية جهد 66/11 مثلا إلى (الموزعات) ، ثم من الموزعات إلى محولات التوزيع المنتشرة داخل الأماكن السكنية. وتتضمن منظومة التوزيع العناصر التالية:

- لوحات توزيع الجهد المتوسط (الموزع) وهى أول نقطة فى شبكة توزيع الجهد المتوسط وتستقبل كابلات المغذيات من محطات التحويل الرئيسية.
- خطوط الجهد المتوسط وتشمل خطوط هوائية أو كابلات أرضية أو الاثنين معا
- أكشاك سكاكين شبكة الجهد المتوسط للمساهمة فى عمل مناورات تغيير الخطوط
- لوحات الـ RMU وهى وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات فى الشبكة من جهة الجهد المتوسط
- محولات التوزيع وهى آخر عناصر شبكة الجهد المتوسط ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض.

وأما الجزء الثانى من منظومة التوزيع فيشمل اللوحات والكابلات الموجودة فى جهة الجهد المنخفض من محول التوزيع. وهذا الجزء تم تغطيته فى كتابى المرجع فى التركيبات الكهربية ، فلن نتعرض له هنا.

و كل من يتعامل مع تخطيط شبكات التوزيع لابد له أن يكون قادرا على رؤية الصورة الكاملة لمنظومة التوزيع ، كما يجب أن يتعرف على ملامح تخطيط هذه المنظومة ، وخطوات إنشائها ، وأدوات تنفيذ ذلك ، ومعرفة عناصرها ، وأن يكون متمكنا كذلك من بعض الأدوات والبرامج التى تساعده فى عملية التخطيط.

ويمكن أن نوجز أهم هذه العناصر الأساسية التى يجب أن يلم بها أى دارس لشبكات التوزيع فى السبع نقاط التالية:

17.1.1 تحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات:

كل مصمم أو مخطط لمنظومة التوزيع يجب عليه تحقيق الأهداف التالية فى تصميمه :

- تحديد مواقع وأحجام المحولات ، و الـ C.B ، و الـ switches ، و الـ feeders .
- تحقيق الأمان Electric Saftey خاصة أن هذه الشبكة هى الأقرب للمستهلكين.
- تحقيق البساطة فى التصميم لاسيما فى الدول النامية التى لا تتوفر فيها مستوى عال من التعليم.
- تقليل القدرة المفقودة Power Losses فى الشبكات
- تحسين قيم الجهود Voltgae profile عند الأماكن المختلفة بتقليل الـ Voltage Drop.
- دراسة لخطة وضع (المكثفات و منظمات الجهد) كمحسنات للجهد و وسائل لتقليص الفقد ومن ثم اضافتهم لخطة التوزيع للشبكة ، وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم.
- استخدام distributed generators DGs واستخدام الـ cross connection, CCs كمحسنات للاعتمادية (CC هى أجهزة تقوم بتوصيل الـ (feeders) ببعضها حيث يمكن تغذية الحمل من feeder اخر اذا حدث fault بالـ feeder الاساسى) . ثم اخذهم فى الاعتبار عند التخطيط لشبكة التوزيع . وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم.
- رفع قيمة معاملات الاعتمادية Reliability Index ، (وخاصة فى الاحمال الاستراتيجية والأكثر أهميا مثل أحمال المستشفيات). مع العلم أن رفع مستوى اعتمادية مصدر التغذية بدرجة كبيرة يعنى تكلفة ضخمة ، ولذا يكون غالبا هناك نوع من الموازنة بين ضمان استمرارية التغذية وبين التكلفة.
- تحقيق المواصفات القياسية الوطنية المتعلقة بتصميم الشبكات لضمان تماثل أجزاء الشبكة وتسهيل عمليات الصيانة وتوفير قطع الغيار ، فالاستعانة بشركات أجنبية متعددة فى مشروعات مختلفة يمكن أن يترتب عليه شبكات توزيع غير متناسقة فى البلد الواحد بسبب اختلاف المواصفات التى تتبعها كل شركة.

مع الأخذ فى الاعتبار أن تحقيق هذه الأهداف ليس بالأمر الهين ، فبعض هذه الأهداف متعارض ، وهناك أيضا بعض المحددات التى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار لضمان تحقيق الأهداف ومنها:

- الميزانية المتاحة للتكلفة
- الموقع الجغرافى للحمل : وهذا يؤثر على موقع المحطة بعدها أو قربها من الحمل كما يؤثر على قيمة المفاقيد

- أحجام المحولات والمساحة المتاحة للمعدات .
- التوسعات المستقبلية

17.1.2 الدراسات الخاصة بالأحمال Load Stduies:

أى دارس لمنظومة التوزيع عليه أن يكون مجيدا لمجموعة دراسات تتعلق بالأحمال، وتعتبر أدوات هامة فى التصميم وهى :

- حسابات تقدير الأحمال Load Estimation
- تقدير الأحمال المستقبلية Load Forcasting
- دراسة خصائص الأحمال Load Charactraristics

وتحت هذا البند يجب أن يلم الدارس أيضا بطبيعة الأحمال التى تغذيها شبكة التوزيع ، وهى ثلاثة أنواع:

أ. أحمال سكنية سواء فى المدن او القرى

ب. أحمال خدمات (شوارع – مطارات مبانى حكومية – مولات تجارية)

ت. أحمال صناعية (الورش والمصانع الصغيرة والكبيرة).

والاختلاف الأساسي بين هذه الأحمال يكمن فى طريقة حساب معاملات تقدير الأحمال مثل معامل الطلب Demand Factor الذى يستخدم لتحديد نسبة تزامن تشغيل أحمال من نفس النوع (دائما أقل من واحد) ، و معامل تباين الأحمال Diversity Factor الذى يستخدم لتحديد نسبة تباعد تشغيل الأحمال ذات النوعيات المختلفة (دائما أكبر من واحد) ، كما أن هناك أمورا أخرى تؤخذ فى الاعتبار مثل تيار البدء للمحركات الكبيرة فى الورش أو المصانع.
وأحيانا تغذى شبكة التوزيع الواحدة مزيجا من الأحمال الثلاثة ، ماعدا المصانع الكبيرة فدائما يكون لها شبكة توزيع مستقلة.

أما حسابات الحمل المتوقع Load Forcasting فهى تعتمد على عوامل كثيرة ملخصها فى الشكل 17-1.
ويعد توقع الحمل " load forecasting " من الخطوات المهمة فى تحديد عملية التشغيل والتخطيط للشبكة ، حيث انه يكون من أوائل الخطوات بالاضافة لكونه العامل الرئيسى فى تحديد حجم المحول .

وينقسم الـ load forecasting تبعا للمدة الى ثلاثة أقسام :

1. Short term load forecasting : up to 1 day
2. Medium term load forecasting : from 1 day to 1 year
3. Long term load forecasting : from 1 year to 10 years

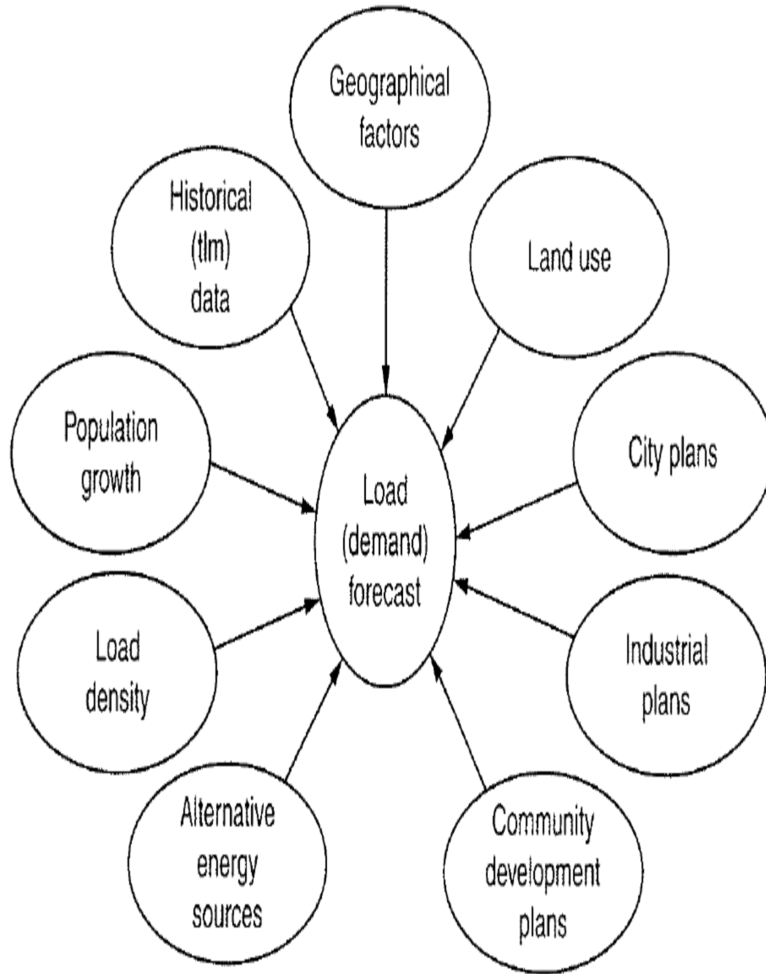


Figure 17-1 العوامل المثرة على قيمة الطلب المتوقع

17.1.3 توصيف عناصر شبكات التوزيع :

من الأمور الهامة لأى دارس لمنظومات التوزيع أن يكون ملما بطبيعة ومواصفات المعدات الأساسية التى سيستخدمها لتنفيذ شبكة التوزيع. وأهم المعدات فى شبكة الجهد المتوسط التى يجب أن يعرف مواصاقاتها ما يلى:

- الموزعات Distributors
- المحولات بأنواعها
- لوحات الربط الحلقى Ring Main Unit
- كابلات الجهد المتوسط : توصيفها وتفاصيل طبقاتها

- عناصر شبكات الجهد المتوسط الهوائية (العوازل —— السكاكين – إلخ)
- عناصر شبكة الجهد المنخفض (كابلات ، قواطع ، لوحات توزيع ، ATS ، UPS ، مولدات الديزل ، إلخ) .
- عناصر منظومة التحكم والمراقبة فى الشبكة (RTU ، SCADA ، إلخ).

ويجب على مهندس التوزيع أن يكون خبيرا بأنواع ومواصفات كل عنصر من العناصر السابقة.

17.1.4 البدائل المتاحة فى عملية تصميم شبكات الجهد المتوسط

تخطيط شبكات التوزيع يتضمن بدائل متعددة واختيارات كثيرة للبند الواحد ، وسيكون على المهندس أن يتخذ قرارات باختيارات معينة من ضمن هذه البدائل المتاحة. ولذلك يجب أولا أن يكون ملما بهذه البدائل وميزات وعيوب كل بديل. ومن أمثلة البدائل المتعددة التى سيواجهها المهندس مايلى:

- نوع أسلوب التوزيع Radial / Ring
- نوع الشبكة Over Head/Cables
- المحولات (جافة/ زيتية)
- جهد التغذية 11/22 kV
- نوع المحطة AIS/GIS
- نوع أجهزة الوقاية CB / Fuse
- كابلات أم Bus Duct
- نظام الـ BB وهل هو Single/ Double/etc
- طرق تحسين الجهد Voltage regulators/Capacitors/ Tap changer
- هل نستخدم الـ Distribted Generation أم لا ، وما أنسب مكان /حجم/نوع.

17.1.5 الدراسات والحسابات والبرامج المطلوبة لعملية التخطيط

والغرض من هذه الدراسات التى يحتاجها مهندس التوزيع هو التأكد من صحة التصميم ومنها:

- حسابات القصر Short Circuit Studies
- حسابات الهبوط فى الجهد Voltage Drop
- حسابات التحمل الحرارى للكابلات Thermal capacity
- تنسيق أجهزة الوقاية Relay Coordination
- حسابات سريان القدرة Load flow Study

• حسابات وقياسات التوافقيات Harmonics Studis

وكل هذه الدراسات يمكن أن تتم باستخدام برامج جاهزة مثل برنامج ETAP أو برنامج EasyPower وغيرهما (توجد نبذة عن هذه البرامج والفروق بينها فى نهاية الباب. وبعض هذه البرامج متاح مجانا على الانترنت ، وعلى كل دارس لشبكات التوزيع أن يكون محترفا على الأقل فى واحد من هذه البرامج .

17.2 استخدام الـ OPTIMIZATION TECHNIQUES

تبدأ عملية التخطيط الفعلى لشبكات التوزيع بعد انتهاء الدراسات الأولية بتحديد أماكن المحولات وقدراتها . وبناء على أماكن المحولات فإننا نحدد طريق الـ(Feeders) الخاصة بالجهد المتوسط و الجهد المنخفض . وبالطبع فنحن نحتاج إلى طريقة سريعة للوصول لأفضل الأماكن التى تؤدى إلى تقليص التكاليف الخاصة بالمحولات والـ (Feeders) وأيضا تقليل المفاقيد (Losses) ، كما نحتاج للوصول إلى أعلى قيمة من الاعتمادية (Reliability) للشبكة ، مع الأخذ فى الاعتبار تخفيض قيمة الـ (voltage drop) لتكون فى المدى المسموح به وفقا للمواصفات.

ومعظم هذه المتطلبات متعارض مع بعضها البعض ، فتقليل الـ Loss قد يكون بزيادة مقطع الكابلات وهذا يزيد التكلفة ، وهكذا ، وهذا هو المدخل الذى دعانا لاستخدام مبادئ الـ Optimization فى تخطيط شبكات التوزيع وتعنى الوصول لأفضل الحلول ، فالحل اليدوى سيظل قاصرا أمام الكم الكبير من الأهداف المتعارضة ، والبديل هو استخدام الـ Optimization.

17.2.1 كيفية الوصول للحل الأمثل

دائما يكون الفيصل فى اختيار حل ما هو ما ستجنيه من مكاسب ، وهذه المكاسب هى ما يعبر عنه رياضيا بالـ Objective Functions أى المكاسب المرجوة ، فقد تكون الـ Objective Function لنظام ما هو زيادة الـ Stability Margin مثلا ، وقد تكون تقليل الفقد فى الطاقة ، وقد تكون التكلفة الأقل إلى غير ذلك من المكاسب المرجوة . وفى مثل هذه الحالات نكون أمام ما يسمى بـ Single Objective Function. وفى المقابل قد يكون هدفك تحقيق عدة مكاسب وهو ما يسمى بالـ Multi-Objective Functions

وسواء كان هدفك هو مكسب واحد أو مكاسب متعددة فسيكون أمامك اختيارات متعددة ، فمثلا إذا كان الهدف هو زيادة الـ Stability Limit عن طريق وضع مكثفات ثابتة فى الشبكة فسيكون لديك مشكلة جديدة وهى : فى أى محطة نضع هذه المكثفات وهل نضعها فى محطة واحدة أم نوزعها على أكثر من محطة؟

وهذا هو المدخل لما يسمى بالـ Optimization Techniques كما ذكرنا. وهى أساليب رياضية متعددة الأشكال لكن خلاصتها أنك تكتب Objective Function معينة تهدف للوصول إليها ، و هذه الـ Function

مكتوبة بدلالة عناصر متغيرة (وحيدة أو متعددة) ، وبالطبع أيضا سيكون هناك عدد من الـ Constrains أى شروط ومحددات للحل بمعنى أن الحل الأمثل هو مثلا هو من يعطينى تغيرا فى الجهد لا يتجاوز 3% بالزيادة أو النقصان وبشرط ألا يتجاوز حجم المكثفات المستخدمة مثلا قيمة الحمل المركب إلى غير ذلك من الشروط التى تضعها لتضمن أن يكون الحل الذى تبحث عنه بواسطة الـ Optimization Technique عمليا ومقبولا.

ويكون دور الـ Optimization Technique المستخدم هو سرعة الوصول للحل الأمثل وتحديد القيمة المثلى للمتغيرات مع تحقيق الشروط الموضوعة حيث أن العملية تحتاج لتجربة قيم مختلفة ومتعددة ولا يصلح معها بالطبع الحل اليدوى.

ومن هذه الطرق:

1. Particle Swarm Optimization, PSO
2. Genetic Algorithms
3. Cuckoo Search

وبالطبع لكل واحدة منها ميزاتها وعيوبها من حيث سرعة الوصول للهدف والدقة فى تحقيق الهدف.

وحتى يمكن المقارنة الصادقة بين الحلول المقترحة من الباحثين فقد قامت الـIEEE بوضع عدة نماذج لشبكات التوزيع تختلف فى عدد الـ BBs وقدرات الأحمال . والشكل 17-2 هو واحد من هذه الأشكال ويعرف بشبكة الـ 33-BBs.

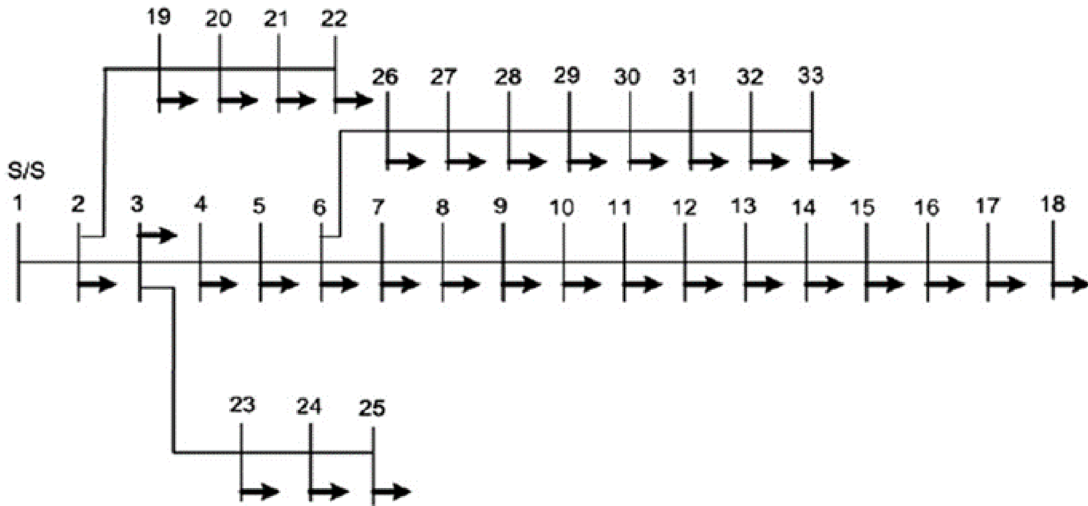


Figure 17-2 IEEE 33-bus

وهذه الشبكات متاحة للجميع بحيث تتم تجربة أى أسلوب مقترح على نفس الشبكة وبالتالي تكون المقارنة صادقة بين الأساليب المختلفة.

17.3 خريطة هذا الباب

الفصل الأول من هذا الباب بعد هذه المقدمة يدرس أمثلة تطبيقية لخطوات تصميم شبكة توزيع ، و سيجد القارئ أن معظم الخطوط العريضة التى عرضت هنا فى هذه المقدمة قد مررنا بها خلال هذه الأمثلة التطبيقية. لكن بعضا من هذه الخطوط سيحتاج لمزيد من التفاصيل ، وهو ما سنقدمه فى الفصول من الثانى إلى الخامس.

ففى الفصل الثانى نتعرض لدراسة أهم عناصر شبكة التوزيع وتشمل:

1- الموزعات Distributors .
2- محولات التوزيع.
3- لوحات الربط الحلقى الـ RMU ، والربط مع شبكة الجهد المنخفض

بينما يخصص الفصل الثالث لدراسة منظومات التغذية المختلفة فى شبكات الجهد المتوسط ، وكذلك دراسة تأثير دخول التوليد الموزع Distributed Generation على شبكات التوزيع .

ويخصص الفصل الرابع لدراسة الشبكات الهوائية ، بينما يخصص الفصل الأخير لدراسة الاعتمادية وتنظيم الجهد ، وأيضا دراسة منظومة التحكم والمراقبة فى شبكة الجهد المتوسط.

18

أمثلة تطبيقية لتخطيط شبكات الجهد المتوسط

فى هذا الفصل سيتم تحديد مراحل عامة فى تخطيط وتصميم شبكات التوزيع من خلال مثال تطبيقى .

18.1 مراحل تصميم شبكة توزيع

18.1.1 المرحلة الأولى: تقدير الأحمال

سنتخيل بناء مدينة جديدة أو توسعات ملحقة بمدينة ما (الخطوط العريضة لهذا الفصل مأخوذة بتصرف من مقال للمهندس يسرى عبد السلام) . فالمرحلة الأولى دائما هى مرحلة حسابات تقدير الأحمال . وبالطبع هذا سيتوقف على طبيعة الأحمال فى هذه المنطقة ، فتقدير الأحمال السكنية يختلف عن تقدير الأحمال الصناعية مثلا ، بل أن الأحمال السكنية نفسها تختلف حسب مستوى المعيشة ، وهل هو إسكان فاخر أم إسكان شعبى إلخ.

وكذلك الأحمال الصناعية تتغير تقدير الأحمال فيها حسب كثافة استهلاك الطاقة لإنتاج المنتج المطلوب. والجدول 18-1 يعطى نموذجا لكثافة استهلاك الطاقة فى بعض الأنشطة الصناعية .

Table 18-1 تقدير مبدئى للأحمال الصناعية

المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)	المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)
أسمنت (طن)	١١٢	سكر خام (طن)	٢٢٠
البنزين (طن)	٣.٥	الصوديوم (كيلوجرام)	١١
ورق (طن)	٥٠٠	الألمنيوم (كيلوجرام)	٢٠
فوسفات الأمونيوم (طن)	١٦	حامض الكبريت (طن)	٣٦
صلب (طن)	٢٣٠	الأمونيا والكلور (طن)	١٦٨٠
حديد خام (طن)	٢٥	سجاد (١٠٠٠ متر مربع)	١٧٧٠

ومن ثم فيمكن بمعلومية المساحة ونوعية الأحمال والخطط المستقبلية للتوسعات الوصول إلى تقدير لأحمال هذه المدينة.

وبالطبع سنحتاج فى هذه المرحلة لدراسة معاملات مهمة مثل معامل الطلب Demand Factor ، ومعامل التشتت أو التباعد Diversity Factor وغيرهما . وصعوبة هذه المعاملات أنها تقديرية وليست ثابتة وتحتاج لمناقشات مع الخبراء فى هذا النشاط.

كما سنحتاج فى هذه المرحلة لتحديد الأحمال غير العادية مثل المحركات الكبيرة ذات تيار البدء المرتفع والأحمال الصناعية الخاصة إن وجدت وخاصة الأفران وماكينات اللحام الكبيرة ، والأحمال ذات دورات التشغيل الخاصة.

وعادة فإن التصميم يبدأ من أسفل لأعلى أى من الأحمال إلى محطات التغذية كما فى الشكل 18-1 ، فعند تصميم شبكة يجب معرفة عامل الطلب Demand Factor, F_{dm} للأحمال المتشابهة ، وعامل التباين Diversity Factor, F_{dv} للأحمال المختلفة على الموزعات الفرعية بالشبكة لتحديد الحمل الأقصى Max Demand, D لكل موزع فرعى ، ثم نجمع هذه الأحمال القصوى لكافة الموزعات الفرعية ونقسمها على معامل التباين (دائما أكبر من واحد صحيح) لهذه الموزعات وبالتالى نحصل على الحمل الأقصى للموزع الرئيسي ، ومجموع الأحمال القصوى للموزعات الرئيسية مقسوما على معامل تباينها يعطى الحمل الأقصى لمحول التوزيع الموجود فى مراكز الأحمال ، وتتكرر العملية حتى نصل لمحطة التحويل.

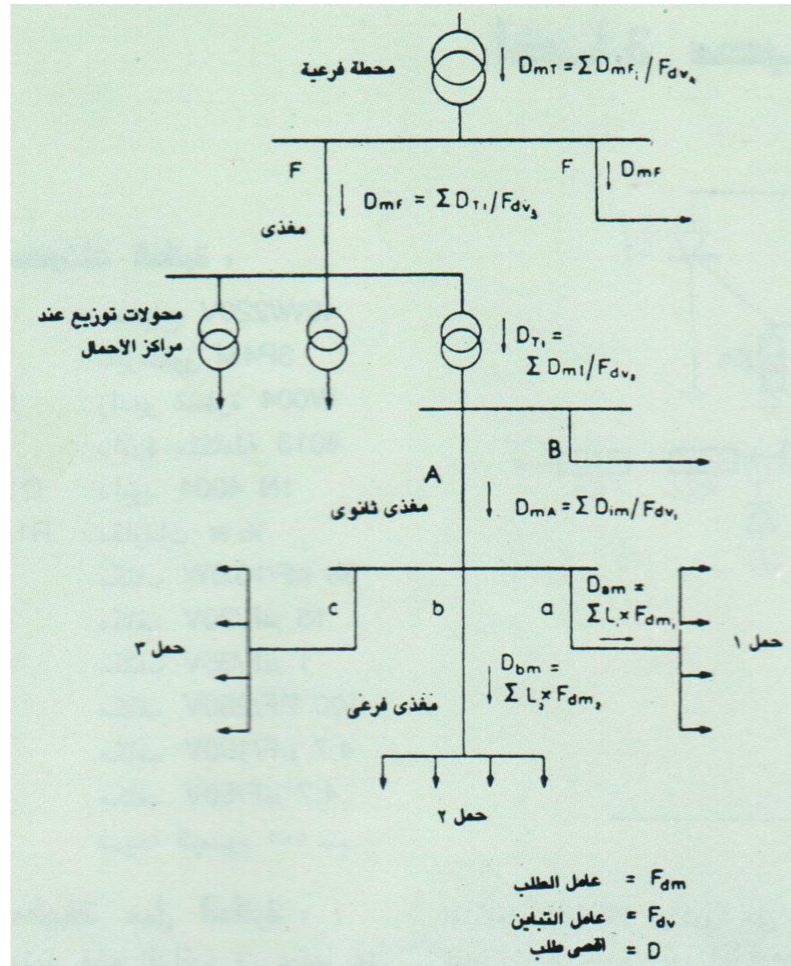


Figure 18-1 مراحل تطبيق معاملات الأحمال

18.1.2 المرحلة الثانية : إختيار جهد محطة التوزيع

يمكن تقسيم محطات التوزيع Distribution Substtations إلى نوعين:

1- محطات توزيع ابتدائية جهد 11/132 ك ف أو 11/33 أو 66/ 11 ك ف ، أو 11/33 ك ف ، وهذه المحطات هى حلقة الربط مع شبكة الجهد العالي وتمثل بداية شبكة الجهد المتوسط.

ويشتمل هذا النوع من المحطات على عدد من العناصر مثل المحولات والقواطع وقضبان التوزيع وسكاكين العزل وأجهزة التحكم والوقاية والقياس والاتصالات إلخ . وهى بذلك تشبه تماما محطات التحويل التى درست فى الباب الثالث ، ولذا لن نعيد الكلام عنها هنا. ونكتفى فقط بهذا الـ SLD لمحطة جهد 11/66 ك ف شكل 18-2 ، كنوع من اختبارات التذكر ، ويفترض الآن أن تقرأه بسهولة حتى لو لم نكتب اسم العنصر على الرمز المستخدم.

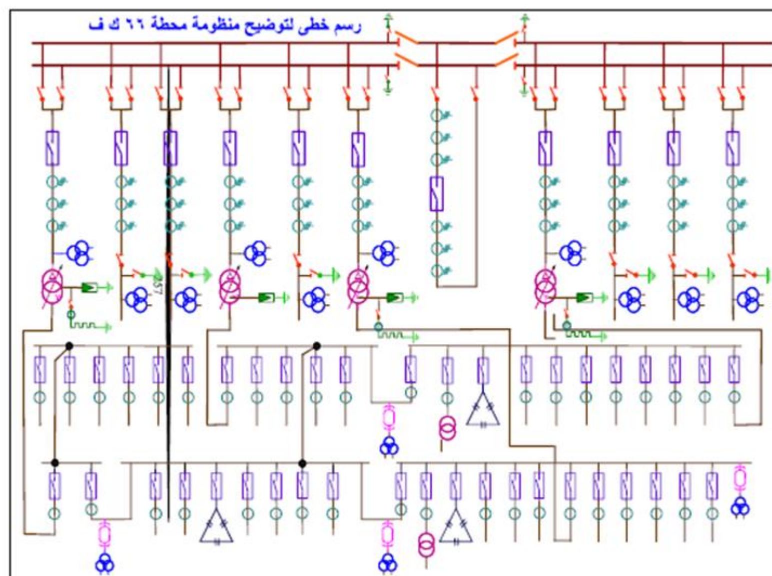


Figure 18-2 Substation SLD

2- محطات توزيع ثانوية (محطة الخدمات أو أكشاك المحولات) وتعمل على جهد 11/0.4 ك ف (المدن القديمة فى مصر مثل حلوان أو المعادى) أو 22/0.4 ك ف (المدن الجديدة مثل التجمع الخامس أو 6 أكتوبر ، والمناطق السياحية) ، وهذه المحطات تمثل قلب شبكة الجهد المتوسط. وهى أقل حجما وأبسط فى التركيب من المحطات الابتدائية ، فغالبا تضم فقط محول أو أكثر متصلين على Sectionlized Single BB أو Single BB ، وتتصل من ناحية بالـ RMU ومن ناحية أخرى بكشك أو أكشاك توزيع الجهد المنخفض .

وغالبا تكون منظومة الوقاية فيها مبسطة ، وقد لا تتجاوز فى بعض الأحيان استخدام فيوزات للحماية كما هو الحال مع المحولات ذات القدرة الأقل من 1MVA ، إضافة إلى بعض المعدات الأخرى البسيطة كما سنرى.

3- وبين هاذين النوعين من المحطات توجد الموزعات Distributors التى تستقبل المغذيات الخاصة بها Incomming Feeders من المحطات الابتدائية ثم تخرج منها كابلات الـ Outgoing Feeders إلى المحطات الثانوية (لا يوجد بالموزعات أى محولات ، سوى محول صغير فقط لخدمة مهمات الموزع نفسه كما سندرس ذلك تفصيليا)

وعليك فى هذه المرحلة من التخطيط أن تحدد :

- هل سنحتاج مثلا إلى محطة محولات جهد 33/11 or 66/22 or 66/11 كمرحلة أولى ، ثم بعد ذلك هل ستستخدم محولات توزيع جهد 11/0.4 kV أو جهد 22/0.4 kV كمرحلة ثانية للوصول للمستهلكين ، أم ستختار محطة جهد 11/0.4 kV مباشرة كمرحلة واحدة .

وهذا بالطبع سيتوقف على القدرة الإجمالى ة (KW) للحمل المحسوب فى المرحلة السابقة.

لاحظ أنه في المدن الجديدة والمناطق الصحراوية يكون جهد دوائر الدخول و الخروج فى الموزعات هو 22 kV وذلك ليتحمل الأحمال الجديدة حيث يتم رفع الجهد لينخفض التيار فى الكابلات (أو الخطوط الهوائية) و يؤدي ذلك إلى زيادة قدرة الكابل (أو الخط) فيتحمل ضعف الأحمال تقريبا (لنفس مساحة المقطع) مقارنة بجهد 11kV ، لكن بالطبع على حساب زيادة عزل الكابل.

و يمكن الاسترشاد بالقيم التالية عند اختيار الجهد المناسب للمحطة الرئيسية:

- عندما تكون القدرة بين 100 kW إلى 5MW يتم التغذية بجهد 11 kV
- ما بين 5MVA إلى 15MVA يتم التغذية بجهد 22 kV
- ما بين 15MVA إلى 30MVA يتم التغذية بجهد 33 kV

والقدرات الأكبر من ذلك تنقل عبر شبكات النقل حسب الجهود التالية:

- ما بين 30MVA إلى 75MVA يتم التغذية بجهد 66 kV
- ما بين 75MVA إلى 200MVA يتم التغذية بجهد 132 kV
- وعندما تزيد القدرة عن 200MVA يتم التغذية بجهد 500 kV أو 220 kV.

وبالطبع قد تختلف هذه الحدود من دولة لأخرى.

مع ملاحظة أن اختيار جهد الدخول سيؤثر على اختيارات أخرى كثيرة بعد ذلك، منها اختيار حجم الموصل الذى يكون دائما متناسبا مع التيار المار به ، و يتأثر هذا الاختيار بالقدرة المنقولة والمسافة التي سيقطعها الكابل الرئيسي للوصول للمحطة حيث يجب أن ناخذ بعين الاعتبار سعة تحمل الأسلاك للتيار.

فمثلا في حالة نقل قدرة 22 MVA إلى منطقة بعيدة تصل إلى 25 كيلو متر مثلا ، فإذا نقلنا القدرة بشبكة جهد 11 kV سيكون التيار المنقول يساوى 1157A، وبالتالي يجب اختيار كابل له مساحة مقطع كبيرة نسبيا لتحمل هذا التيار العالي ، ولكن إذا رفعنا جهد خط النقل إلى 33 kV فسيقل التيار وتقل مساحة المقطع للكابل.

وتوجد علاقة رياضية تساعد فى حساب الجهد المناسب لخط معين حسب القدرة المنقولة P وحسب طول الخط الناقل L بالكيلومتر كما فى المعادلة التالية:

$$V = 5.5\sqrt{L + \frac{P}{100}}$$

وفى هذه المرحلة سيكون علينا حسم قيمة نسبة تحويل المحولات:

بالطبع سنحتاج لتركيب محول ليخفض الجهد العالي من 66 kV أو 33kV إلى جهد 400 فولت ولكن هذا غير مفضل لأن تصنيع هذه المحولات يحتاج إلى درجة عزل عالية ، وبالتالي زيادة التكلفة و لذلك يتم التخفيض على مرحلتين:

- فى المرحلة الأولى من 33 kV إلى 11 kV أو من 66 kV إلى 11 kV
- ثم فى المرحلة الثانية يتم التخفيض مرة أخرى من 11kV إلى جهد التوزيع المنخفض (400 فولت) والذى يسمى بجهد التوزيع الثانوى.

18.1.3 المرحلة الثالثة : اختيارات المحطة / المحطات الرئيسية

بعد معرفة قيمة الحمل ، وتحديد مستوى الجهد تكون الخطوة التالية هى المفاضلة بين عدة خيارات خاصة بمحطة التحويل التى ستغذى المدينة ، فمن هذه الخيارات :

- هل نستخدم محول واحد كبير داخل المحطة أم مجموعة محولات أصغر حجما ؟

فإذا تم تركيب محول واحد لتحويل جهد33 kV إلى جهد11 kV ثم حدث عطل بالمحول فستصبح المنطقة بكاملها غير مغذاة بالكهرباء ، ولذا يفضل استخدام محولين يوصلان معا على التوازي أو يكون أحدهما منفصل لكنه احتياطي للآخر عند حدوث أى مشاكل في التشغيل كما فى الشكل 18-3.

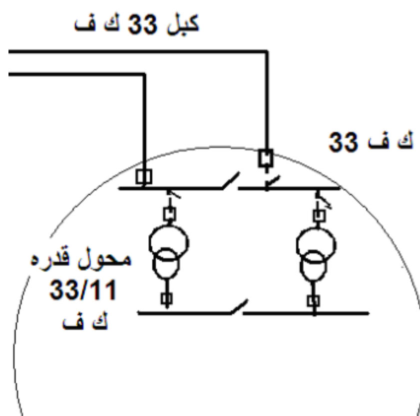


Figure 18-183

- أين نضع محطة التوزيع الرئيسية؟

ويراعى عند تصميم محطات التوزيع الابتدائية 11/33 أو 11/66 مايلى:

- أن يكون موقع المحطة قدر الإمكان في مركز الأحمال لتقليل أطوال الكابلات وبالتالى يقل الفقد فى القدرة و الهبوط فى الجهد كما هو معلوم.
- أن تكون مساحة المحطة كافية لاستيعاب المحتويات من محولات ومفاتيح والملحقات الأخرى.
- أن يكون تصميمها مناسبا لدخول مغذيات الدخول ، وخروج كابلات الخروج بسهولة وبدون أي عوائق . وهذا يستدعى دائما أن يكون موقع المحطة على شارع رئيسى لسهولة دخول المعدات.
- أن تكون قابلة للتوسع مستقبلا عند زيادة الأحمال

18.1.4 المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع الابتدائية

نحتاج أن نقرر بعد ذلك هل الأنسب اختيار شبكة نقل هوائية أو يتم النقل بالكابلات؟ وما هو أنسب مسار لشبكة النقل؟

يراعى دائما اختيار أقصر الطرق. و يفضل دائما أن يكون المسار موازيا للطرق الرئيسية كلما أمكن ذلك ، وأن يبعد بمسافة تقريبا 30 م عن الطريق بحيث يمكن الوصول إلى الخط من أجل الصيانة بسهولة. وفى حالة المرور بأراضي زراعية يجب أن يكون الخط في مسار يسبب أقل خسائر ممكنة فى موضوع نزع الملكية ، حتى يتم تقديم أقل تعويضات ممكنة وذلك لخفض التكاليف ، ويجب تفادي الكباري ومناطق المستنقعات وتفادي التوازي مع خطوط التليفونات حتى لا يحدث تداخل كهرومغناطيسي معها.

لكي يتم تصميم محطة توزيع ابتدائية يجب تحديد كلا من قدرة محولات القوى حسب حجم الأحمال ، ونوعية القضبان فى لوحات توزيع الجهد العالي ، وعدد اللوحات وكذلك لوحات الجهد المتوسط وعددها وكذلك تحديد مقاطع الكابلات المستخدمة في الربط بين المكونات .

وفى هذه المرحلة يمكن تحديد عدد المغذيات للمحطة ، وهل يمكن مثلا تغذية المحطة بكابل واحد من المحطة الرئيسية ؟

فلو فرضنا أن المدينة مقسمة إلى ثلاثة أجزاء وأن أحمال كل جزء تصل إلى 15MVA وأن الجهد المتوسط المستخدم فى شبكة التوزيع هو 33 kV فهذا يعنى أن التيار المار فى كابل التغذية يساوى

$$I = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 33} = 262A$$

وبعد أخذ معاملات الأمان فى الاعتبار وكذلك معاملات الـ De-ratings من عمق الدفن والكابلات المتجاورة ودرجة الحرارة إلخ نجد أن أنسب كابل يصل مقطعه إلى 400 ملم^2 بعازل XLPE .

لكن استخدام كابل واحد سيتسبب فى خروج الأحمال كلها مع حدوث أى عطل على هذا الكابل. ولذا يفضل تغذية المحطة بكابلين.
وبالطبع سيتوقف اختيار مقطع الكابلات وكافة معدات الشبكة على دراسة مستوى القصر Short Circuit Capacity ونوع التأريض والهبوط فى الجهد المسموح به.

وهناك أسلوب آخر يمكن استخدامه إذا كانت المدينة مقسمة إلى ثلاثة مناطق مثلا (فرضا أنها مناطق متشابهة ، فعندها يمكن بدلا من توصيل كابلين لكل محطة أن يتم توصيل كابل واحد من المحطة الرئيسية على أن يتم ربط المحطات معا على شكل حلقة Ring كما فى الشكل 18-4 .

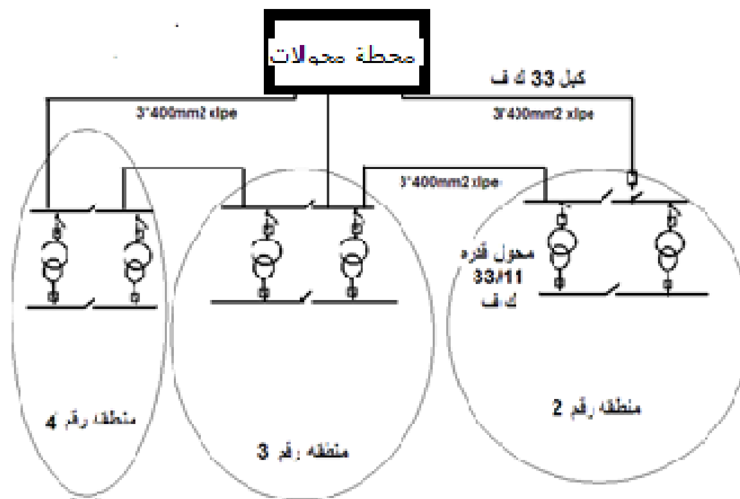


Figure 18-4

18.1.5 المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية Radial/Ring ؟

أصبح الآن فى كل منطقة بمخطط المدينة محطة محولات رئيسية جهد 11/33 ك ف ، ومطلوب من هذه المحطة أن تغطى الأماكن المختلفة فى كل منطقة بمحولات جهد 11/0.4 ك ف لتغذية أحمال المستهلكين ، فلو فرضنا أن لدينا فى كل منطقة من المناطق الثلاثة السابقة بها عدة تجمعات وكل تجمع يحتاج إلى محول منفصل قدرة 1.5 MVA ، فكل محول منهم سيحتاج لكابل تغذية مقطعه يتحمل تيار قدره

$$I = \frac{1500}{\sqrt{3} \times 11} = 78A$$

وبأخذ معامل أمان ومعاملات الـ De-rating فى الاعتبار وكذلك بعد أخذ إحتمالات الهبوط فى الجهد فى الاعتبار سنجد أن أنسب كابل قد يصل إلى 95 ملم^2 نحاس . فى هذه الحالة يمكن أن يكون أحد طرق التغذية

هى الطريقة Radial Feeding كما فى الشكل 18-5 حيث تتميز هذه الطريقة بالبساطة وقلة التكلفة ، لكن هذه الطريقة لها مع ذلك عدة عيوب منها:

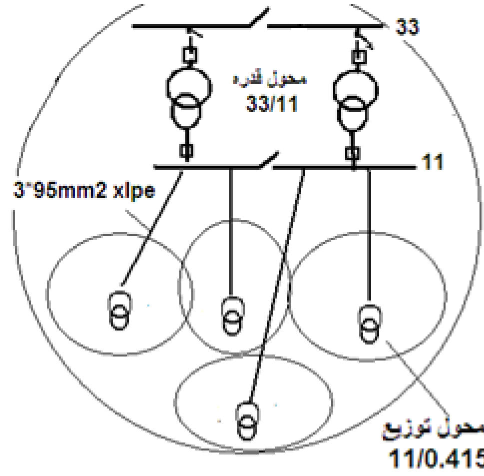


Figure 18-5 Radial feeders

1- إمكانية فصل وتشغيل المحول الفرعى موجودة فقط في لوحات التوزيع الـ 11 kV أي تبعد عن المحول بمسافات كبيرة قد تتعدى الكيلو متر وهذا يصعب عمليات إصلاح الكابل مثلا.
2- فلو فرضنا أن المنطقة تحتوى على 50 محول توزيع فرعى وليس أربعة كما فى الرسم فهذا يعنى أننا نحتاج إلى 50 خلية منفصلة فى الموزع وأيضا سنحتاج لكابلات بأطوال كبيرة وهذا طبعا غير منطقي.
3- حدوث عطل فى كابل تغذية المحول يؤدى لخروج أحمال هذا المحول من الخدمة .

وللتغلب على المشاكل السابقة يمكن استخدام طريقة التغذية الحلقية Ring System حيث يتم تغذية مجموعة محولات من كل خلية فى الموزع وليس محول واحد ، وكل محول من مجموعة المحولات سيتم تغذيته من خلال وحدة الـ Ring Main Unit, RMU التى تربط المحولات جميعا معا . وزيادة فى تأمين الأحمال فإنه يتم ربط كل مجموعة محولات فى حلقة تغذى من خليتين منفصلتين فى الموزع كما فى الشكل 18-6. تفاصيل أكثر عن هذه الطرق تجدها فى الفصل الثالث من هذا الباب.

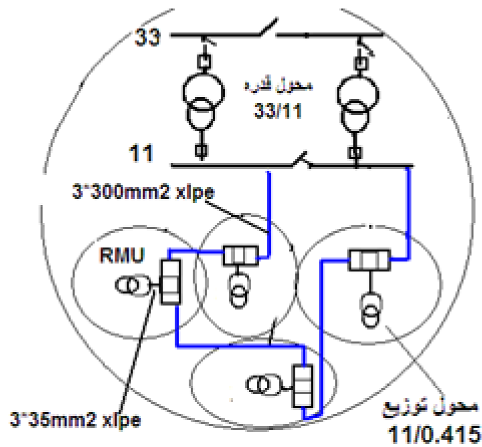


Figure 18-6 Ring System

18.1.6 كيف يتم حساب مقطع الكابل فى التغذية الحلقية؟

كان تحديد مقطع الكابل فى طريقة الـ Radial System مبسطا ومباشرا ، أما هنا فنحتاج لتوضيح كيف سيتم حساب مقطع الكابل. بداية يجب تحديد ما هو أكبر عدد من المحولات التى يتم تغذيتها عبر الكابل ، فعلى سبيل المثال فى الشكل السابق يكون الجزء الأول فى الكابل معرضا لتحمل تيار أربعة محولات فى حالة فصل التغذية من الجهة الأخرى ومن ثم يجب تصميم هذا الكابل على تحمل ذلك العدد.

لكن عمليا ، يتم التصميم بالعكس ، بمعنى أن الكابلات غالبا تستخدم بمقاطع موحدة فى الشبكة ، و يعرف الكابل بقدرته على تغذية عدد معين من المحولات ، فمثلا كابل 300 ملم^2 يستطيع تحمل تيار قدره 400 امبير ، إذن قدرة هذا المغذى تساوى $400 \times 11000 \times \sqrt{3} = 7MVA$ ، ولو فرضنا أن المحولات الموجودة قدرة 1MVA وأنها لا تحمل بأكثر من 70 % من قدرتها فهذا يعنى نظريا أن هذا الكابل يمكن أن يغذى عدد من المحولات يساوى عشرة محولات $7 \div 0.7 = 10$ وأن كان هذا الرقم عمليا سيتم تخفيضه لظروف الحرارة وبقية معاملات الـ De-rating ، فربما لا يتجاوز 7 محولات بدلا من عشرة.

18.1.7 المرحلة السادسة : حسم نوعية محطة التحويل الابتدائية هوائية/غازية؟

كما هو معلوم ، يوجد نوعان من المحطات :



Figure 18-7 GIS building

1- النوع الأول هو محطات توزيع ابتدائية معزولة بالغاز Gas Insulated Subststions (GIS)، ويتواجد هذا النوع من المحطات بداخل المدينة حيث يتم وضع جميع مكونات هذا النوع من المحطات بداخل مبنى كما بالشكل 18-7(محطة بالسعودية) ، و يحتوى بداخله على كل مكونات المحطة ، و تكون مكونات المحطة المعزولة بالغاز داخل خلايا Bays (راجع فصل المحطات المعزولة بالغاز بالباب الثالث).

2- النوع الثاني من محطات التوزيع الابتدائية هى المحطات المعزولة بالهواء (Air Insulated Subststions (AIS). وفي هذا النوع من المحطات يكون الهواء هو الوسط العازل بين قضبان التوزيع ، وتكون مكونات تلك المحطة بعيدة عن بعضها البعض بمسافات كبيرة نسبيا. وقد سبق دراسة ميزات وعيوب كل نوع من أنواع المحطات (غازية أو هوائية) فى الباب الخاص بمحطات التحويل.

18.1.8 المرحلة السابعة : اختيار نوعية قضبان التوزيع

فى الباب الثالث درسنا أنواعا متعددة من قضبان التوزيع. لكن فى محطات التحويل الصغيرة يكثر استعمال نوعين فقط هما:

1- الـ Single BB ، وهو أبسط نظام مستخدم كما فى مخطط الـ SLD (شكل 18-8) الذى يمثل محطة توزيع فرعية ، حيث يغذي المحطة موزع رئيسي واحد.

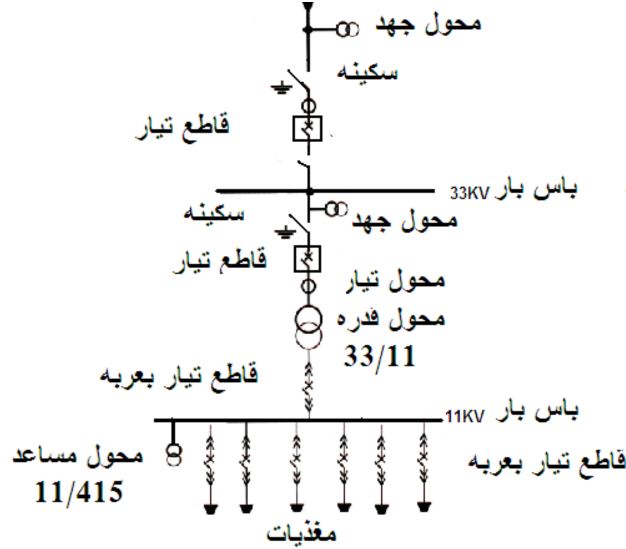


Figure 18-8 Single BB

ويعيب تلك الأنواع من التوصيلات أنه في حالة عطل المحول أو قضبان التوزيع تنقطع التغذية عن جميع الأحمال.

2- لتفادى حدوث الفصل التام للأحمال في الشكل السابق يتم استخدام محولين سعة كل محول منهما تبلغ% 70 من سعة المحطة ، وأيضا يمكن استخدام Double BB مقسم إلى جزئين لكي يعطى مرونة في التشغيل (شكل 18-9).

و يتميز هذا النظام بقلة قيمة تيار القصر نسبيا. ويتميز أيضا بأنه عند وجود عطل بمحول يتم نقل الأحمال إلى المحول الآخر. وهذا يعنى اعتمادية عالية. وأيضا في حالة وجود عطل أحد الـ BBs يتم نقل الأحمال إلى الآخر، وبذلك نكون ضمنا سهولة في التشغيل وتقليل قدر المستطاع فى فترة انقطاع التغذية.

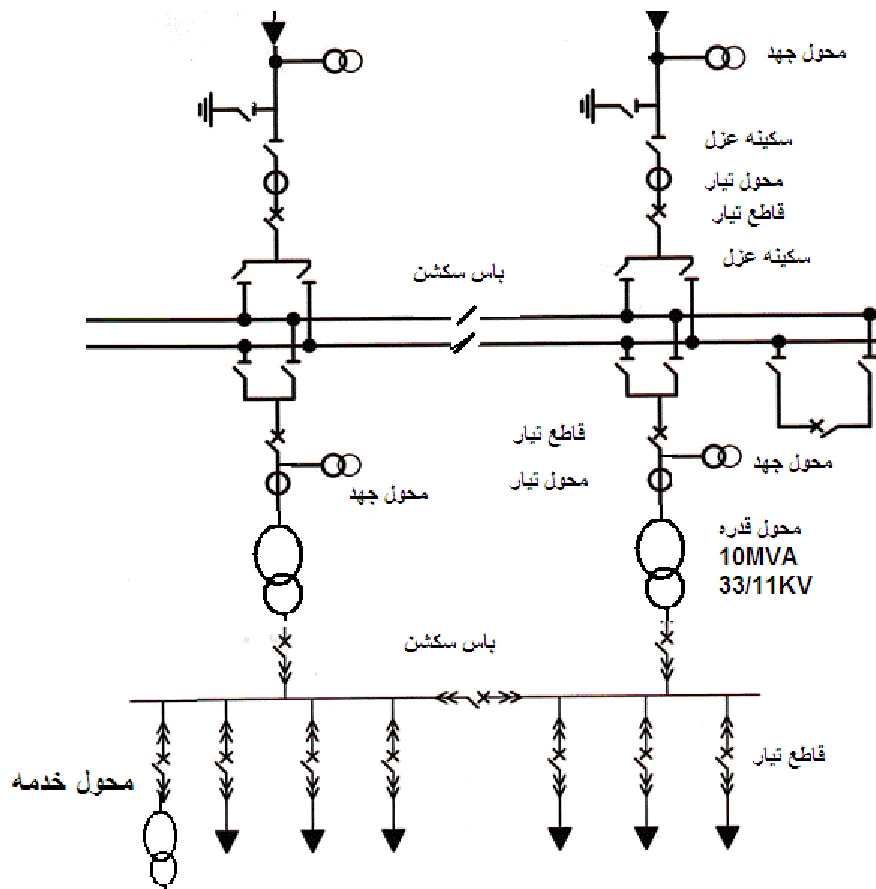


Figure 18-9 Double BB in HV side

19

العناصر الأساسية بشبكة التوزيع

عناصر منظومة التوزيع تتضمن ما يلى :

1- الموزعات Distributors .

2- محولات التوزيع.

3- لوحات الربط الحلقى الـ RMU ، والربط مع شبكة الجهد المنخفض

4- عناصر خاصة بشبكات التوزيع الهوائية

والعناصر الثلاثة الأول سيتم دراستهم فى هذا الفصل ، بينما يخصص الفصل التالى لدراسة عناصر الشبكات الهوائية. وفيما يلى تعريف مختصر ومعلومات عامة عن العناصر السابقة قبل البدء فى دراستها بصورة تفصيلية.

1- العنصر الأول فى هذه المنظومة هو الموزعات Distributors . وهى عبارة عن لوحات توزيع للجهد المتوسط ، وهى أول نقطة فى شبكة توزيع الجهد المتوسط ، حيث تستقبل كابلات المغذيات (جهد متوسط) من محطات التحويل الرئيسية ، ثم تخرج منها كابلات تغذية لمحولات التوزيع المنتشرة فى المدينة (جهد متوسط أيضا).

2- العنصر الثانى هو محولات التوزيع ، وهى محولات قوى تتراوح قدرتها بين عدة عشرات من الـ kVA وتصل حتى 10MVA ، ويكون جهدها فى ناحية الابتدائى إحدى قيم الجهد المتوسط السابقة (3.3 kV – 6.6 kV – 11 kV – 22 kV – 33 kV) ويكون جهدها فى ناحية الثانوى 400 فولت.

وبالتالي فهى تختلف عن محولات القوى الموجودة فى منظومة النقل فى قيمة القدرة (قدرة المحولات فى شبكة النقل تبدأ من 10 MVA وتصل إلى مئات الـ MVA) وتختلف أيضا فى الجهود.

وسيكون الحديث عن محولات التوزيع هنا مقتضبا ، حيث يمكن الرجوع لكتابى المرجع فى محولات القوى الكهربية لمن يريد التفاصيل. لكن سأعرض هنا فقط بعض المعلومات التى لم تذكر فى الكتاب السابق وأهمها حماية المحولات صغيرة الحجم باستخدام الفيوزات.

3- العنصر الثالث فى المنظومة هو لوحات الـ RMU وهى وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات فى الشبكة من جهة الجهد المتوسط . ويرتبط بها أكشاك شبكة الجهد المنخفض للمساهمة فى عمل مناورات تغيير الخطوط.

4- العنصر الرابع هو شبكة كابلات الجهد المتوسط الهوائية وتضم الأبراج والعوازل والموصلات والسكاكين ومانعات الصواعق إلخ.

19.1 ضخامة منظومة التوزيع

تمثل منظومة التوزيع أكثر من 50% من إجمالى رأس المال لمنظومة القوي الكهربية ككل ، ويرجع هذا الى انخفاض الجهود فى شبكات التوزيع وارتفاع التيارات وبالتالي استخدام عدد كبير من الكابلات والمحولات والأكشاك والمهمات المختلفة بالإضافة إلى ضرورة استخدام أطوال كبيرة من الكابلات للوصول للمستهلكين ، وهذا يفسر أهمية العناية بمنظومة التوزيع من حيث التصميم والتركيب والتشغيل والصيانة.

وأحد أهم الاختلافات بين شبكتى النقل والتوزيع هو الاختلاف فى أعداد المهمات (المعدات) فى نفس المساحة الجغرافية. ففى شبكة النقل ربما لا تجد فى مساحة جغرافية طولها مثلا 20 كم أكثر من بضع مئات من أبراج النقل وربما محطة محولات واحدة ، وقد لا تجد. بينما فى نفس هذه المساحة داخل مدينة سكنية ستجد شبكة التوزيع تحتوى على عشرات الموزعات ومئات المحولات و الآلاف من أكشاك الجهد المنخفض ، إلخ).

واللوحة التالية شكل 19-1 تبين الحجم الضخم لمهمات هذه الشبكة فى مركز تحكم واحد فقط (تحكم مدينة نصر) بمدينة القاهرة ، فهذا المركز مسئول عن 53 موزع تغذى حوالى 2500 محول من خلال شبكة كابلات يصل إجمالى طولها إلى حوالى 2800 كم . وهذا كله فى حى واحد فقط ضمن أحياء مدينة القاهرة.

هذه الموزعات (الـ 53 ، والتى تغذى 2500 محول) تأخذ تغذيتها من:

- عدد 3 محطات تحويل (محطات نقل) جهد 11/66/220 ك ف ، وهى : محطة محولات الاستاد ، ومحطة محولات الشرق ، ومحطة محولات صقر قريش.
- ثم عدد 8 محطات تحويل جهد 11/66 ك ف ، (محطات توزيع ابتدائية) وهى محطات محولات : الزهراء ، والمقطم ، والمروة ، ومدينة نصر ، والهجانة ، والنزهة ، والجبل الأخضر، ورابعة العدوية.

والمحولات (الـ 2500) الموجودة بهذه الشبكة معظمها داخل مبانى (سواء حكومية أو خاصة) ، كما يوجد عدد 361 محول داخل أكشاك محولات فى الشارع مباشرة.

مكونات شبكة التوزيع فى تحكم مدينة نصر Figure 19-1

وفيما يلى سندرس بالتفصيل أهم خصائص عناصر شبكة التوزيع التى ذكرناها إجمالا فى هذه المقدمة.

19.2 العنصر الأول فى منظومة الجهد المتوسط : الموزع

19.2.1 المهمات داخل مبنى الموزع Distributor

كما ذكرنا ، فالموزع هو نقطة البدء فى شـــبكة الجهد المتوســـط ، وكل موزع مســـئول عن تغذية مجموعة من المحولات فى المنطقة المحيطة به ، وفى الغالب لا يوجد محولات داخل مبنى الموزع نفســه ، وإنما فقط كابلات جهد متوسط دخول وخروج ، وإن كان هناك بعض الموزعات التى يوجد بها محول خدمة بقدرة 25 kVA .

والموزع ليس إلا مجموعة من خلايا توزيع جهد متوسط متصلة ببعضها البعض عن طريق قضبان نحاسية كما فى الشكل 19-2 ، ويستخدم لاستقبال القدرة الكهربية من محطات المحولات الرئيسية عبر كابلات جهد متوسط بقدرات وجهود مختلفة وتوزيعها على محولات التوزيع الثانوية بقدرات وجهود مختلفة.

وبداخل مبنى الموزع هناك عدة مهمات :

1- لوحة التوزيع (الموزع).
2- مهمات جهد منخفض ، وتشمل البطاريات وشواحن البطاريات
3- منظومة الاتصالات والتحكم (غالبا لاسلكى)
4- مهمات الأمن الصناعى للوقاية من الحرائق

وفى الجزء التالي سنشرح بالتفصيل الأجزاء الخاصة بلوحة الموزع وهى كما ذكرنا تمثل العنصر الرئيسى بالمبنى.

19.2.2 لوحة التوزيع (الموزع)

تتكون لوحة الموزع من خلايا متجاورة كما فى الصـورة شكل 19 -2، وتكون الخلايا مثبتة على بارات حديدية على ارتفاع كاف من سـطح الأرض من أسـفل لسـهولة ربط الكابلات بها . ويتم تجهيز وضـــع لوحة الموزع بالشـكل المناسـب بحيث لا يتعارض مع حرية الحركة والدخول للمعدات داخل المبنى، لذلك يراعى وضـــع اللوحات بجوار الجدران دون ملاصقة لها حتى يمكن لفرق الصـيانة فتحها من الخلف أثناء عمليات الإصـلاح والصيانة بسهولة وإدخال معدات الصيانة

ويراعى أيضـا وضـعها بعيدًا عن الأبواب الرئيسـية والفرعية ومنافذ الهروب وبعيدًا عن أماكن المعدات التي تحدث اهتزازات وكذلك إبعادها عن خطوط انابيب المياه بأنواعها وأنابيب الغازات. وتركب اللوحة على قاعدة أسـمنتية مرتفعة عن مسـتوى أرضـية المبنى حماية لها من المياه أثناء عمليات التنظيف ويتم أيضـا تجهيز مجارى للكابلات أسفل اللوحات لسـهولة توصـيل الكابلات الكهربية بها حيث يوجد بدروم أسـفل الخلايا لتمديد الكابلات.



Figure 19-2 الموزع

وبصفة عامة تحتوى لوحة الموزع على عدة أنواع من الخلايا:

1- مجموعة من خلايا الدخول (الشائع فى مصر استخدام ٤ خلايا دخول)
2- مجموعة من خلايا الخروج (الشائع ٨ خلايا خروج)
3- خليتين لرابط القضبان ، أحدهما لـ Bus Riser والأخرى خاصة بالـ Bus section, BS
4- خلية القياسـات وتأريض البارة (Bus Metering and Bus Earthing): ويوجد بها محول جهد VT للبارة يغذى جميع أغراض خلايا الخروج على نفس هذه البارة لأنه غالبا لا يوجد VT مســتقل لكل Outgoing لتقليل التكلفة. كذلك يوجد بها أجهزة Voltmeter للبارة ويوجد بها كذلك سكينة التأريض للبارة.
5- خلية تغذية المحول المسـاعد لمحطة التوزيع (Auxiliary Transformer Cubical): وهى خلية لتغذية المحول المســاعد وتشــبه تماما خلية الخروج العادية لكن يزيد عليها فقط وجود بعض الـ auxiliary/lockout relays الخاصة بالوقاية الميكانيكية للمحول.
6- توجد أيضا خلية تغذية مكثفات تحسين معامل القدرة التى تكون مركبة على قضبان الـ 11kV ، وتسمى Capacitor Bank Cubical ، وتشبه خلايا الخروج تقريبا.

19.2.3 التحكم فى الموزعات

ويوجد فى مبنى الموزع لوحتى تحكم:

1- لوحة تحكم خاصـــة بالمكثفات وهى Automatic Capacitor Control System, ACCS ويتم عن طريقها التحكم فى دخول وخروج المكثفات تلقائيا بناءا على قيمة الـــ Reactive Power ، وحسب قيمة الجهد الذى ضبط عليه الـ Setting .

2- لوحة تحكم خاصة بالجهد المتوسط تسمى Automatic Bus Transfer Scheme, ABTS وهى تشبه لوحة الـ Automatic Transfer Switch, ATS الموجودة فى لوحة الجهد المنخفض. ووظيفة الـ ABTS هى فتح أو غلق رابط القضبان (Bus-Couplers) أوتوماتيكيا.

ولشرح هذه الوظيفة نفترض أن لدينا مثلا 3 محولات جهد 33/11kV متصلين بحيث أن جهد الثانوى لهم يكون موصلا على ثلاث Sections منفصلة فى بارة الــ 11kV ، وعندها سيكون لدينا عدد (2) من الـ Bus-Sections بين الـ Sections الثلاثة ، وفى الغالب يكون اثنان من المحولات الثلاثة متصلين على التوازى (BS بينهما مغلق) ، والمحول الثالث يكون مغذي لـــ Section الثالث منفردا ، وذلك للحد من الـ Short-circuit Level على الـ 11kV .

A. لو حدث عطل على أى محول من الاثنين الموصـــلين على التوازى وتم فصـــله ، فســتقوم الـ ABTS بالغلق الأوتوماتيكى لـ Bus-Section الثانى لكى يدخل المحول الذى كان منفردا مع المحول المتبقى ليغذيا معا الـ 3 Sections لعدم فقد الأحمال.

B. لو رجع المحول المفصـــول وصـــارت المحولات المحولات الثلاثة على التوازى ، فســتقوم الـ ABTS بفصل الــ Bus-Section الثانى لفصل محول لتقليل الــ Short-circuit Level على الـ kV11.

ملاحظات:

- عادة تكون هناك دائرتى تغذية فقط (كل دائرة تغذى نصف الــــ BB) إذا كانت كل دائرة منهما قادرة على تغذية كامل الأحمال المغذاة من الموزع. أما إذا كانت الأحمال الكلية للموزع أكبر من قدرة دائرة تغذية واحدة فإن الأمر يقتضـــى اســـتخدام أربع دوائر تغذية وبالتالي يكون عدد خلايا الدخول للموزع أربعة.

- يفضـــل وجود أربعة مغذيات كل اثنان منهما يغذيان نصـــف الموزع لضـــمان اســـتمرارية الكهرباء عند حدوث عطل فى اى من مغذيات الدخول فى اى نصـــف ، ويفضـــل أن تكون تغذية نصـــف الموزع مختلفة عن النصـــف الآخر بحيث يكونا من محطات محولات ابتدائية مختلفة ، أو من محولات مختلفة داخل نفس المحطة.

- خلايا الخروج يكون عددها مساو لعدد دوائر الخروج مضافاً إليها الخلايا الاحتياطية.
- ولأن الموزع مكون من قسمين فنحن نحتاج إلى ربط القسمين معا بواسطة خلايا الربط Bus Coupler التى تتكون من خليتين إحداهما خاصـــة بقاطع الربط Coupling CB لربط جزئى قضـــبان التوزيع والأخرى تسمى بالـــــ Bus Riser ، وهذه ليس بها CB ، وإنما يتم فيها فقط استعدال البارات برفع قضـبان التوزيع من مستوى أطراف الخروج الخاصـة بقاطع الربط إلى مستوى القضـبان فى الموزع كما فى الشكل 19-3
- ويجب مراعاة وجود Interlock (ميكانيكى/ كهربى) – (يدوى/ تلقائى) ، بين خلايا الدخول من خلال خلية الـ Bus Section.

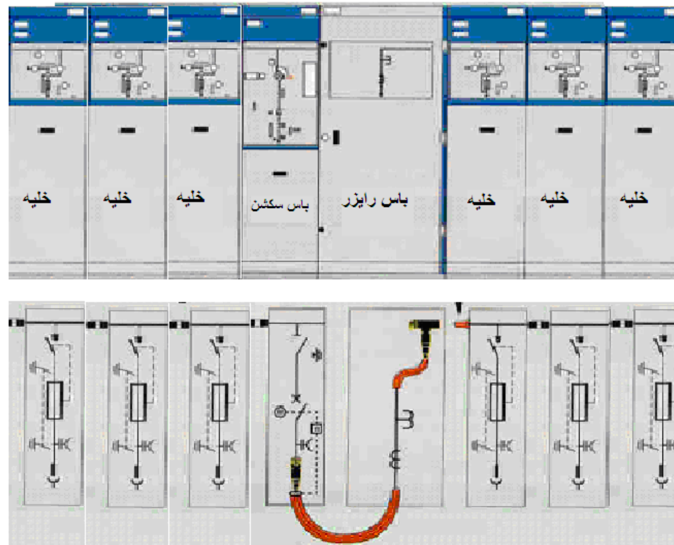


Figure 19-3 خلايا الموزع

19.2.4 مكونات الخلية

كل خلية من خلايا الموزع سواء كانت خلية دخول أو خلية خروج تتكون – من حيث الشكل الخارجى – من ثلاث أقسام كما فى الشكل 19-4:

القسم العلوي : وهو خاص بأجهزة الجهد المنخفض (110 فولت) وتضم أجهزة القياس والحماية

القسم الأوسط : وهو وخاص بوسائل الفصل والتوصيل أي مكان تركيب القاطع وفقا لنوعه وكذلك يمر من خلاله قضبان التوزيع التي هي عبارة عن قضبان نحاسية تأخذ أشكالا مختلفة وذات مساحة مقطع مختلفة حسب الحمل التصميمي و تكون موزعة بطريقة يسهل ربطها مع القاطع .

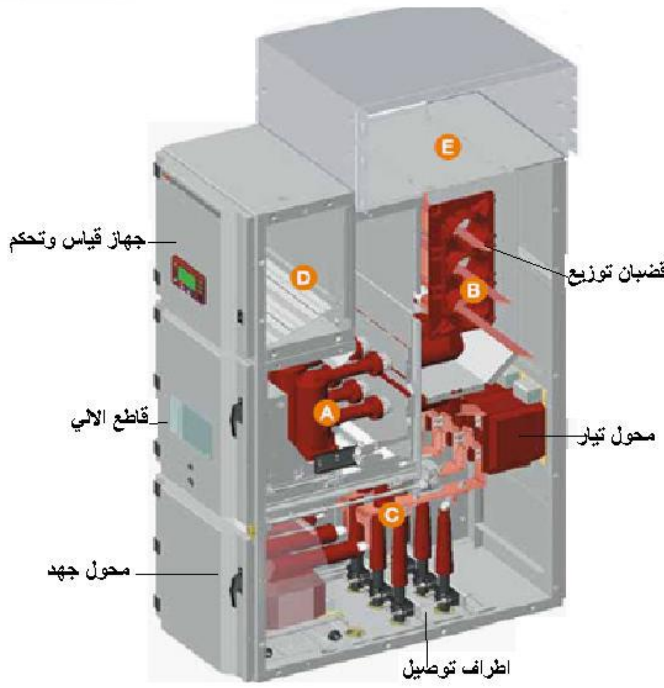


Figure 19-4 تفاصيل خلية فى الموزع

القسم السفلى : وهو مكان خاص بدخول وتركيب الكابلات كما يحتوى أيضا على محول جهد ومحول تيار.

19.2.5 المهمات الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle

تحتوى خلية الدخول على العناصر التالية :(الأرقام الواردة تمثل نموذجا فقط وليست موحدة ولكن غالبة)

1- قاطع تيار جهد متوسط MV-CB ثلاثى الأوجه سعة 1250A .
2- سكينة أرضى موصلة بشبكة التأريض.
3- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر لتشغيل دوائر الفصل والتشغيل للقاطع.
4- كابلات الدخول بمساحة مقطع 3*(1*400) أو 3*300
5- عدد "3 " محولات تيار(5/5/400) يستخدم كل واحد منهم مع Phase من الـــــ 3-phases ، لتغذية أجهزة الوقاية والقياس.
6- عدد "3 " أميتر لقياس التيار بالأمبير
7- عدد "3 " محول جهد $\frac{11000}{\sqrt{3}}/\frac{110}{\sqrt{3}}/\frac{110}{\sqrt{3}}$
8- عداد طاقة فعالة وغير فعالة
9- مبين وضع القاطع ومبين وضع لسكينة الأرضي.
10- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع

11- أجهزة الحماية وتشمل:

- Over current Relay حماية ضد زيادة التيار
- Earth Fault Relay حماية ضد تسرب الأرضي
- Directional Over Current Relay حماية ضد زيادة التيار الاتجاهى
- Directional Earth Fault Relay حماية ضد التسرب الأرضي الاتجاهى
- انترلوك ميكانيكي بين سكينة الأرضي وبين القاطع يمنع توصيلهما معا.

19.2.6 المهمات الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing

تحتوى خلية الخروج على العناصر التالية:

1- قاطع تيار جهد متوسط ثلاثى الأوجه سعه 630 أمبير أو 1250 أمبير
2- سكينة أرضى موصلة ببار الأرضي
3- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر الخاص بتشغيل دوائر الفصل للقاطع
4- كابلات الخروج ومقطعها 3*150 أو 3*240 ملم2
5- عدد "3 " أميتر لقياس التيار بالأمبير
6- عدد 3 محول تيار وفى الغالب تكون 5/5/200
7- مبين وضع القاطع ومبين وضع لسكينة الأرضي.
8- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع
9- أجهزة الحماية وتشمل :

- Over current Relay حماية ضد زيادة التيار
- Earth Fault Relay حماية ضد تسرب الأرضي

لاحظ أن خلية الخروج تحتوى على CT فقط ولا تحتاج إلى VT بسبب عدم وجود Directional relay فى دوائر الخروج (هناك حالات خاصة يوجد بها VT إذا احتوت الخلية على عداد قياس الطاقة لمشترك معين) .

19.2.7 المهمات الموجودة بخلية الربط :

يوجد خليتين للربط تحتوى الأولى على المهمات التالية:

- القاطع سعه 1250 أ
- جهاز وقاية ضد زيادة التيار والتسرب الأرضي

أما الخلية الثانية فهي خلية استعدال بارات فقط كما ذكرنا.

19.2.8 مخطط لوحة الموزع

دائما تظهر التفاصيل الفنية الداخلية الخاصة بلوحات الموزعات على SLD كما الشكل 19-5 الذى يظهر لوحة تتكون من 14 خلية (K1–K14) ، بعض هذه الخلايا تكون خلايا دخول للكابلات المغذية للوحة (K5,K6,K9,K10) ، والباقى خلايا خروج لتغذية المحولات المنتشرة بالمنطقة ، ماعدا الخليتان رقم K8, K7 فيمثلان رابط القضبان . وجميع الخلايا لها نفس الجهد.

ويمكن أن ترى أن خلايا الدخول مقسمة إلي مجموعتين ، فهناك الخليتان 5 و 6 موصلتان على نصف الموزع وقادمتان من مصدر مختلف عن الخليتين 9 و 10 اللتان تغذيان النصف الثانى من الموزع . و لا يتم الربط بينهم أبدا إلا في حالة خروج أو توقف إحدى الجهتين عن الخدمة.

لاحظ أيضا أن خلايا الخروج تربط بين الموزع وبين المحولات الموجودة بالمنطقة (11KV / 400V) .

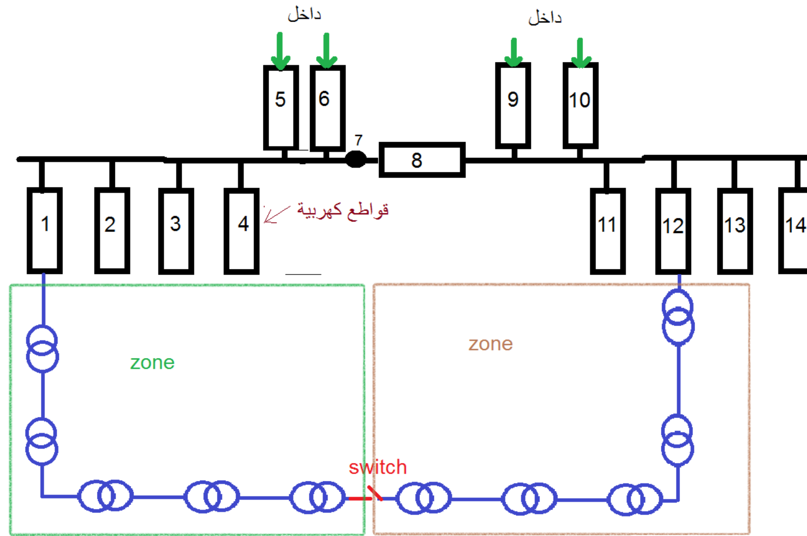


Figure 19-5 Ring system

و يتم توصيل المحولات على شكل Ring فيتم توصيل كل مجموعة محولات مغذاة من إحدى خلايا القسم الأيمن بمجموعة محولات مغذاة من خلية أخرى فى القسم الأيسر ويتم التوصيل بينهم بـ Switch يكون مفتوحا دائما (ويسمى بسكينة فتح المنتصف) و لا يغلق إلا في حالة حدوث عطل في إحدى الخليتين أو عطل فى الكابلات بين المحولات و ذلك من أجل استمرار التيار حتى يتم إصلاح العطل.

19.3 المهمات الأخرى الموجودة بمبنى الموزع:

19.3.1 البطاريات:

وهى تقوم بإمداد أجهزة الحماية بالفولت المناسب وكذلك تغذية ملفات الفصل والتوصيل بالقواطع ، وتغذية لمبات البيان و إضاءة لمبات الطوارىء من خلال ريلاى مساعد فى حالة انسحاب الجهد عن الموزع. علما بأن هناك نوعين للبطاريات:

- حمضية : وعمرها الافتراضى صغير ويتراوح بين سنة واحدة و 5 سنوات حسب عدد مرات الفصل والتشغيل ، وجهد البطارية الواحدة 12 فولت ، وغالبا لا تستعمل مع الموزعات.
- قلوية : وعمرها الافتراضى يصل إلى ٢٠ سنة وهى الأكثر استعمالا ولاسيما النوع الليثيوم وجهد العمود 1.2 V .

ملحوظة: راجع الجزء الخاص بالبطاريات فى الباب الثالث (محطات التحويل) لمزيد من المعلومات.

19.3.2 الشاحن (التونجر)

ودوره هو شحن البطاريات وتغذية أجهزة الوقاية طالما كان يتغذى من خلال محول الخدمة الموجود بمبنى الموزع. فإذا خرج محول الخدمة تصبح التغذية من البطاريات كما فى الشكل 19-6.

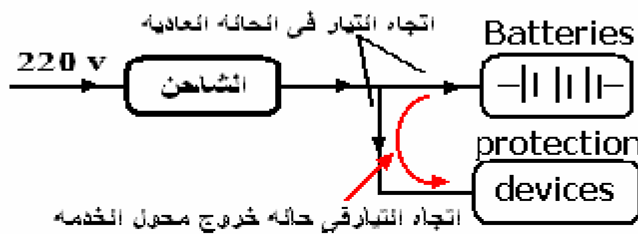


Figure 19-6 توصيل الشاحن

(هناك أكثر من خطأ فى الصورة شكل 19-7 الخاصة بغرفة البطاريات. هل يمكنك تحديدهم؟)



Figure 19-7 غرفة البطاريات

19.3.3 ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟

إذا حدث فصل كامل لمحطة التوزيع فعلى مهندس التشغيل التأكد من سبب الفصل على النحو التالي :

1- مراجعة الريلاى الخاص بمغذيات الدخول للمحطة ، فإذا لم يجد أي خطأ فهذا يعنى أنه لا توجد مشكلة فى مغذيات الدخول للمحطة.

2- فحص قراءة عدادات مغذيات الدخول للمحطة فإذا وجد أنها أصفار و القاطع في وضع تشغيل فهذا يدل ذلك على أن السبب في فصل المحطة هو سبب خارجى (تسمى بحالة انسحاب الجهد).

فى هذه الحالة على مهندس التشغيل فصل كل مغذيات الخروج دون انتظار لأمر من التحكم. ماعدا محول الخدمات فيبقى في وضع تشغيل ثم عليه بالاتصال بمهندس التحكم لإخباره بما حدث ، وعلى مهندس التشغيل بالموزع مراقبة عدادات الجهد لمغذيات الدخول حتى يكون على استعداد لإرجاع الأحمال مرة أخرى.

3- بعد التأكد من رجوع الجهد على مغذيات الدخول و في نفس الوقت بعد أخذ التصريح من مهندس التحكم عليه أن يقوم بإرجاع الأحمال بتوصيل قواطع مغذيات الخروج الـ11 kV واحد تلو الآخر حتى يتم التشغيل بأمان.

19.4 العنصر الثانى فى منظومة الجهد المتوسط : محولات التوزيع

تعرف أكشاك المحولات باسم Kiosk (شكل 19-8) . والكلمة تعنى كشك



Figure 19-8

و الكشك يتكون من 3 غرف (شكل 19-9):

1- غرفة Ring main unit
2- غرفة المحول
3- غرفة لوحة التوزيع الرئيسية للجهد المنخفض MLVS

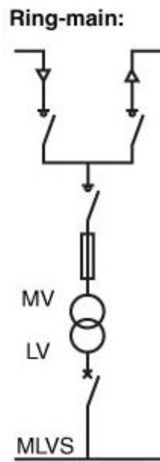


Figure 19-9

و يستخدم الكشك لتغذية مجمع سكنى أو غيره حيث تتصل الـ RMU من جهة بالموزع ، ومن الجهة الأخرى بوحدة RMU أخرى أو تتصل بخلية أخرى من خلايا الموزع ، ويتصل المفتاح الأوسط من الـ RMU بالمحول الذى يقوم بتحويل الجهد المتوسط 11kV إلى الجهد المنخفض 400 volt فى لوحة توزيع الجهد المنخفض MLVS ، و منها إلى الأحمال المراد تغذيتها .

وقدرات المحولات المستخدمة فى شبكة التوزيع هى :

25 kVA, 50 kVA, 100 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 500 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1250 kVA, 1600 kVA, 2000 kVA

والشكل 19-10 يظهر SLD للمجموعة كلها ، ففى الجزء العلوى منه تظهر الـ RMU وعليها منظومة الحماية الخاصة بها ثم المحول ثم دوائر الخروج إلى أحمال الجهد المنخفض .

Figure 19-10 Transformer SLD

ويظهر أيضا ضمن أحمال الجهد المنخفض بعض الدوائر الخاصة بالكشك نفسه وتسمى أحمال الـ single phase وهي :

1- اللمبة للمساعدة في إنارة اللوحة في حالة حدوث عطل أو إجراء معاينة من قبل العامل في الموقع

2- فيشه socket كمصدر كهربي في حالة الحاجة إلى استخدام جهاز قياس في الموقع أو غيره.

3- شفاط مروحة (fan & hood) للتهوية

ويظهر ضمن دوائر الخروج دائرة خاصة بتحسين معامل القدرة Power Factor حيث تتصل بمكثف يركب داخل لوحة الجهد المنخفض.

وتختلف سعات المكثفات على حسب قدرات المحول وكمثال على ذلك:

محول ١٠٠٠ ك ف أ	٧٥ ك فار
محول ٥٠٠ ك ف أ	٤٥ ك فار
محول ٣٠٠ ك ف أ	٢٥ ك فار

والشكل 19-11 يظهر طريقة توزيع العناصر الثلاثة فى داخل كشك المحول

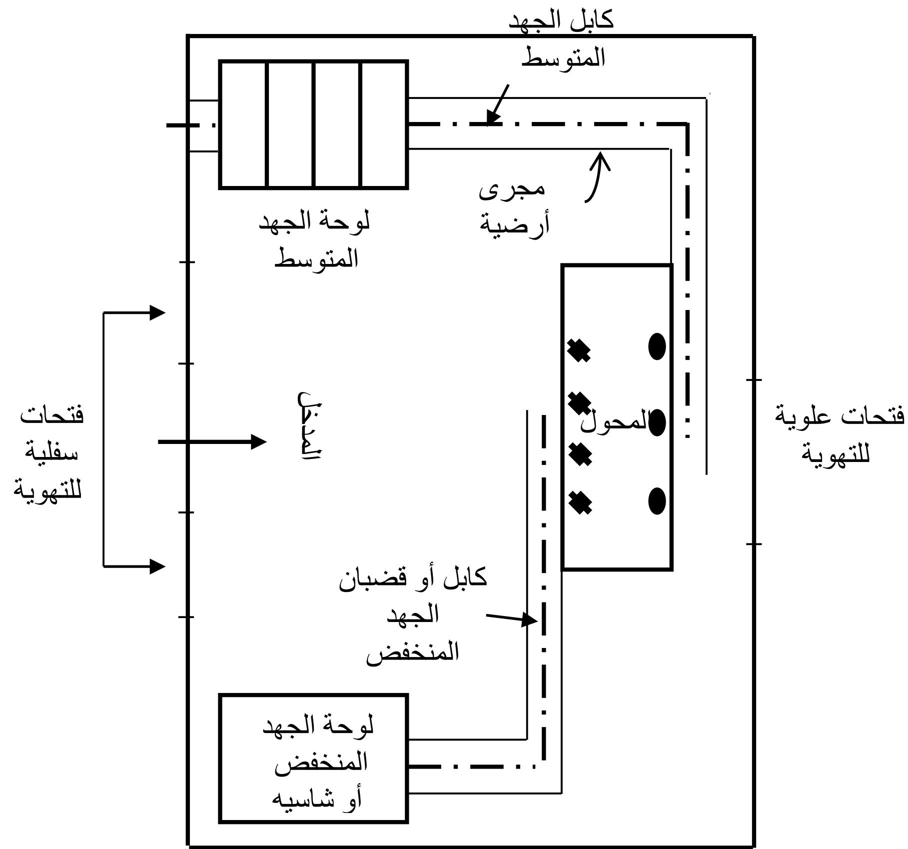


Figure 19-11 غرفة محولات جهد متوسط

19.4.1 استخدام الفيوزات فى شبكات التوزيع

يمكن حماية العناصر الكهربية بالكشك (المحول والمغذيات) إما باستخدام فيوزات أو باستخدام قواطع CB . وفى الغالب يكون المستخدم جهة الجهد المتوسط هو الفيوزات . وفيما يلى نبذة عن هذا العنصر لأهميته:

19.4.2 ميزات وعيوب الفيوز Fuse

هو جهاز حماية يعمل كقاطع عندما يتجاوز التيار المار القيمة المسموح بها ، فيؤدى ارتفاع درجة حرارة المصهر إلى انصهاره بعد زمن محدد على حسب قيمة التيار المار. وهو يعتبر منظومة حماية متكاملة ، فهو يمكنه الإحساس بالتيارات العالية وبالتالي فهو يقوم مقام محول التيار ، وبعد ذلك يتخذ قرار بالفصل من تلقاء نفسه فيقوم بذلك مقام الريلاى الذى يتخذ قرار الفصل ، ويقوم فى نفس الوقت مقام القاطع الذى يقوم بعملية الفصل ذاتها.

والمصهرات أنواع : منها مصهرات الجهد المنخفض وتركب مع المغذيات الخارجة من المحول ، ومنها أيضا مصهرات الجهد المتوسط التى تركب قبل محولات التوزيع وتسمى High Rupturing Capacity, HRC.

والفيوز فى الغالب يكون عبارة عن جسم من البلاستيك أو الخزف يحتوى على عنصر قابل للصهر موصل بطرفى المصهر ويملىء المصهر بمسحوق الكوارتز لاستيعاب درجة الحرارة المتولدة أثناء القصر فلا يحدث له انفجار بسببها.

يتميز الفيوز بسرعة القطع مقارنة بالـ CB حيث يفصل ربما فى ربع دورة (شكل 19-12) بينما يحتاج القاطع إلى دورة كاملة على الأقل ، وهذا يعنى أن الطاقة التى تمر Energy let through (I^2t) خلال الدائرة ضئيلة جدا ولا تسبب مشاكل للعناصر المحمية خلافا للقاطع الذى ربما ينجح فى قطع التيار لكن بعد مرور وقت أطول تكون خلاله كل عناصر الدائرة قد تأثرت بدرجة ما.

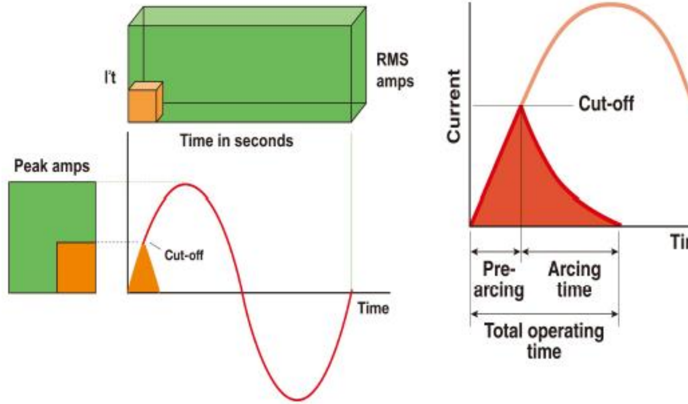


Figure 19-12 Fuse vs CB

لكن أهم عيوب الفيوزات أنه لايوجد منها 3-phase وأنها تعمل فقط على 1-phase ، فإذا ركبت على الفازات الثلاثة وحدث عطل فإنها تفصل لكن ليس فى وقت واحد وقد تفصل فازة واحدة وتترك الاثنين الآخرين وهذا قد يسبب بعض المشاكل.

ونذكر هنا أن الفيوز يعمل فقط على مبدأ Overcurrent Protection ومن ثم لا يصلح إلا لهذه التطبيقات المحددة.

و من عيوب استخدام الفيوز عموما لغرض الحماية أنه لا يتعامل بسرعة مع الخطأ الأرضي وكذلك لا يفرق بين الأعطال العابرة والأعطال المستمرة. ولذلك لا يفضل استخدام الفيوز لحماية الخطوط الهوائية خاصة أن زمن إعادة التيار مرتفع ، لذلك فإن هذه الفيوزات تستخدم فقط لحماية محولات التوزيع سواء المعلقة على الأعمدة أو الموجودة على الأرض.

19.4.3 أرقام هامة لتوصيف الفيوز

القيمة المكتوبة على الفيوز هى **Rated value** وتمثل قيمة التيار الذى يستطيع تحمله ولا ينصهر عنده أبدا.

و يبدأ الفيوز فى الانصهار إذا تجاوز التيار المار خلاه قيمة ما يسمى تيار الصهر **Fusing current** ، والذى غالبا تكون نسبته إلى التيار المقنن تتراوح بين 1.5−4 (تسمى بالـ **Fusing Factor**). بمعنى أن الفيوز 10A لن يبدأ فى الانصهار قبل مرور 30A تقريبا خلاله على الأقل.

ويمكن للسهولة استخدام الجدول 19−1 ، حيث تجد هذه النقطة واضحة تماما ، فأمام كل Rated current ستجد قيمة اسمها **min breaking Current** ، فالفيوز 63 أمبير مثلا لن ينصهر إلا إذا مر خلاله 200 أمبير على الأقل طبقا لما هو مكتوب بالجدول.

وهناك رقم هام أيضا هو الـ **Rated breaking current** وهى الخاصة بتحمل أقصى تيار قصر قبل أن ينفجر الفيوز. وهو يساوى 40kA للفيوز السابق.

Table 19-1

Fuse-link Type	Rated Voltage	Rated current	Rated Breaking Current	Min Breaking Current	Switching voltage	Resis-tance	Weight	Length
	U_n	I_n	I_{ws}	I_{min}	U_m	R± 10%		L
	kV	A	kA	A	kV	mΩ	kg	mm
BWMW-7.2/3.15		3.15		6		650		
BWMW-7.2/6.3		6.3		19.5		195		
BWMW-7.2/10		10		30		130	1.3	
BWMW-7.2/16		16		48		64		
BWMW-7.2/20		20		54		52		192-1
BWMW-7.2/25		25		67		39		
BWMW-7.2/31.5		31.5		80		31	2.6	
BWMW-7.2/40	7.2	40	40	94	<20	25		
BWMW-7.2/56		56		117		16		
BWMW-7.2/63 -1		63		200		15.5		
BWMW-7.2/80 -1		80		280		11	3.6	292-1
BWMW-7.2/100 -1		100		400		8.2		
BWMW-7.2/63		63		150		13.4		
BWMW-7.2/80		80		200		12.5	5.2	442-1
BWMW-7.2/100		100		330		9		
BWMW-12/3.15		3.15	46	7.4		920		
BWMW-12/6.3		63		17.8		300		
BWMW-12/10		10		30		200	1.7	
BWMW-12/16		16		50		100		
BWMW-12/20		20	48	64		76		292-1
BWMW-12/25	12	25		70.6		51		
BWMW-12/31.5		31.5		78	<30	45.5		
BWMW-12/40		40		88		37.2	3.6	
BWMW-12/56		56	40	172		22.5		
BWMW-12/63		63		188		21.6		
BWMW-12/80		80	46	355		16.7	6.1	537-1
BWMW-12/100		100		444		12		

أما زمن فصل الفيوز فيمكن معرفته من منحنيات "الزمن– التيار" الموجودة بالشكل 19–13 ، فزمن الانصهار لفيوز 16 أمبير مثلا إذا مر خلاله تيار قدره 100 أمبير يساوى 0.2 sec طبقا لهذه المنحنيات .

مع ملاحظة أن هناك دائما قيمتين هامتين ترتبطان بزمن الفصل ويظهران فى الشكل السابق:

- الزمن الأول هو pre-aring time ، ويسمي أيضا بزمن الانصهار Melting time ، وهو الزمن من بداية ارتفاع التيار وحتى حدوث الشرارة .
- أما الزمن الثانى فهو زمن استمرار الشرارة arcing time .

وأهمية تعريف هاذين الزمنين يكمن فى أن اختيار مادة المنصهر تتوقف على مجال استخدامه و على الزمن المسموح به لفصل الدائرة بالفيوز ، فكل مادة لها زمن فصل مختلف وبالتالى لها تطبيقات مختلفة.

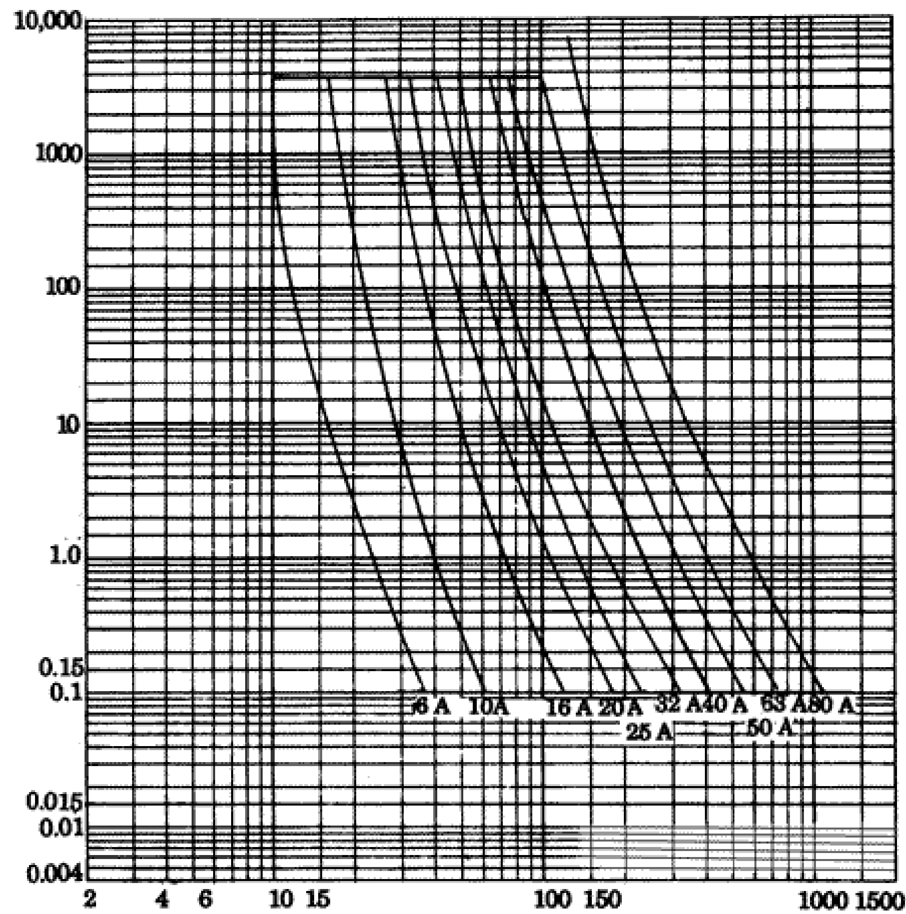


Figure 19-13 Fuse time-current curves

19.4.4 أنواع الفيوزات

1- مصهرات الطرد

ويستخدم هذا النوع من الفيوزات في الأماكن الخارجية وخاصة لحماية الخطوط الهوائية والمحولات المركبة على الأعمدة (الشبكات الهوائية هى الأكثر انتشارا فى أمريكا وكندا من الكابلات) . وتتكون من عنصر صهر داخل أنبوبة لها نهاية مفتوحة ، وعند انصهار عنصر المنصهر يمتد القوس الكهربي بين طرفي المصهر ، ونتيجة لدرجة الحرارة العالية لهذا القوس تتبخر مادة الأنبوبة ، مما يؤدي إلى انبعاث كمية هائلة من الغازات التي ترفع الضغط داخلها مما يعمل على إطفاء القوس الكهربي ومنع إعادة اشتعاله .

ويتم طرد الغازات بشدة إلى الجو من الطرف الأعلى للأنبوبة حيث تستغل شدة اندفاع الغازات في إسقاط الفيوز بأكمله إلى أسفل بحيث يعطي دليلا مرئيًا على انصهاره . ولا يمكن بطبيعة الحال استخدام هذا النوع داخل المباني بسبب الإزعاج وكمية الغازات الهائلة المنبعثة عند الانصهار.

و الشكل 19-14 يوضح هذا النوع من المصهرات.




Figure 19-14 فيوزات طرد

2- فيوزات الجهد العالي "الخرطوشة "

وأشهر استخداماتها أنها تركب بداخل الوحدة الحلقية RMU لحماية المحول وتكون بسعة قطع مختلفة وفقا لقدرة المحول. وهذا النوع من الفيوز يوضع بداخل الزيت ويكون الفيوز في وضع سليم ما لم يخرج أي مسمار من إحدى الجوانب أما لو خرج مسمار فيدل على أن الفيوز قد احترق كما الشكل 19-15 ، ويجب أن يركب الفيوز فى الاتجاه الصحيح حتى يضمن عند حدوث العطل أن يخرج المسمار من الفيوز ويصدم بميكانزم داخلى يعمل على فصل المحول.

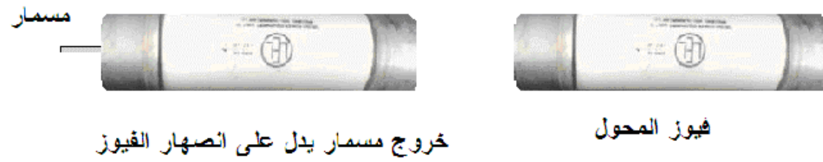


Figure 19-15

19.4.5 قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب

7- يجب أن يكون التيار المقنن للفيوز أكبر من تيار الحمل الأقصى الذى سيمر خلاله. وإلا فإن الفيوز يمكن أن يسخن تحت الظروف الطبيعية وينصهر دون وجود عطل. (معظم أنواع شعيرات الفيوزات المصنوعة من القصدير Type K and T يكون تيار الصهر فيها يساوى تقريبا لـ 150% من تيار الفيوز المقنن).
8- يجب أن يكون الجهد مناسبا للشبكة التى سيركب فيها.
9- يجب أن تكون سعة القطع Short circuiy capacity أكبر من أعلى تيار عطل متوقع مروره (طبقا لحسابات الـ Short Circuit) وإلا سينفجر الفيوز مع الأعطال العالية.

10- يجب التأكد من أن الفيوز المختار لن يتأثر بقيم التيارات العالية الطبيعية مثل تيار بدء المحركات أو تيار الإندفاع الـ Inrush فى المحولات.
11- يجب أن تكون القيمة المختارة لتيار الفيوز متناسقة Coordinated مع الفيوزات التى تليها والتى تسبقها على التوالى.

19.4.6 تنسيق الفيوزات فى شبكات التوزيع

عند عمل التنسيق Coordination بين الفيوزات المركبة على التوالى فإننا نستخدم مصطلح فيوز الواقى Protective Fuse للفيوز الأقرب إلى العطل ، بينما نستخدم مصطلح الفيوز المساند Backup Fuse لذلك الفيوز الذى يليه فى اتجاه مصدر التغذية. وبالطبع يجب أن يكون زمن إزالة العطل فى الفيوز الواقى أصغر من الزمن الذى يستغرقه الفيوز المساند (غالبا لا يزيد عن 75% من زمن الفيوز المساند).
والهدف الأساسى من عملية التنسيق هو ضمان فصل أصغر قدر ممكن من الشبكة بما يحقق فصل العطل مع استمرارية الخدمة لأكبر عدد ممكن من المستخدمين.
ومن خلال دراسة الشكل 19-16 سنقدم نموذجا لعملية تنسيق الفيوزات واختيار قيمها.
فالشبكة فى هذا الشكل تبدأ بمحطة فرعية والحماية الرئيسية أمامها تشتمل على Recloser وهذا معتاد فى هذه الشبكات بسبب كثرة الأعطال التى تصنف على أنها transient faults ، ثم تبدأ الشبكة فى الامتداد والتفرع كما فى الشكل وفى بداية كل تفريعة يوجد فيوز حماية (ب ، ج ، هـ ، د) ثم هناك فيوزات على الأحمال نفسها (ي ، ل ، و) .

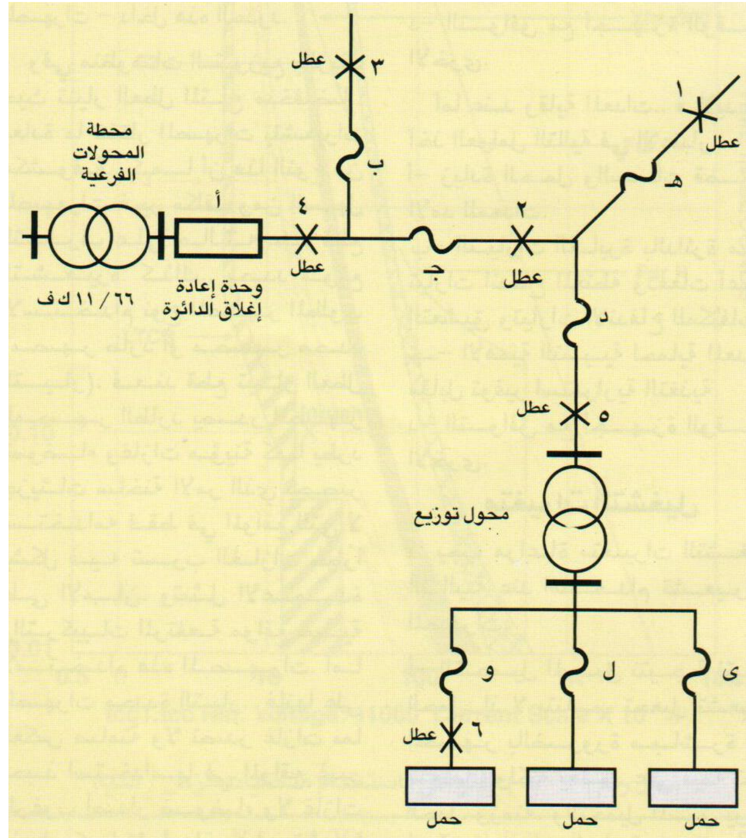


Figure 19-16

لاحظ أن الجهاز أ يجب أن يتوافق مع الفيوز ب ويتوافق مع ج ، وأن الفيوز ج يجب أن يتوافق مع (هـ ، د) ، والفيوز د يجب أن يتوافق مع الفيوزات (ى ، ل ، و) الموجودة عند الأحمال. فماذا يعنى ذلك؟

هذا يعنى أنه فى حالة حدوث عطل عند النقطة 1 ، فإن الفيوز هـ (الفيوز الواقى) يجب أن يفصل قبل الفيوز ج (الذى يعتبر فيوز مساند فى هذه الحالة) . أما فى حالة العطل عند النقطة 2 ، فإن الفيوز ج (الفيوز الواقى فى هذه الحالة) يجب أن يفصل قبل الجهاز أ . وهكذا فى حالة العطل 3 يفصل الفيوز ب قبل أ ، وفى حالة العطل 6 يفصل الفيوز و قبل د . إلخ.

وحتى يتم تحقيق هذه المتطلبات فإننا نحتاج إلى عمل عدة الخطوات:

3- **الخطوة الأولى :** إجراء دراسة مفصلة عن حسابات القصر بالشبكة ، ويمكن أن يتم ذلك يدويا فى الشبكات الصغيرة ، أو باستخدام البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP مثلا.
4- **الخطوة الثانية :** إجراء دراسة عن الـ Load Flow أيضا باستخدام الـ ETAP لتحديد قيم التيارات المارة فى كل تفريعة.

وبناء على القيم التى سنحصل عليها من الدراستين السابقتين يمكن اختيار قيم الفيوزات التى تحقق القواعد العامة لاختيار الفيوزات التى ذكرناها فى البند السابق ، والتى تحقق أيضا التوافق بين الفيوزات المتوالية.

وحيث أن هذه الحسابات على الـ ETAP تقع خارج نطاق الكتاب ، فسأكتفى بعرض نتائج شبكة صغيرة كما فى الشكل 19−17 ، حيث يظهر عند كل فيوز قيمة أكبر وأقل تيار متوقع عند حدوث القصر (داخل دائرة) ، كما يظهر على الفروع قيمة التيار المقنن الذى يمر فى الظروف الطبيعية (فوق سهم).

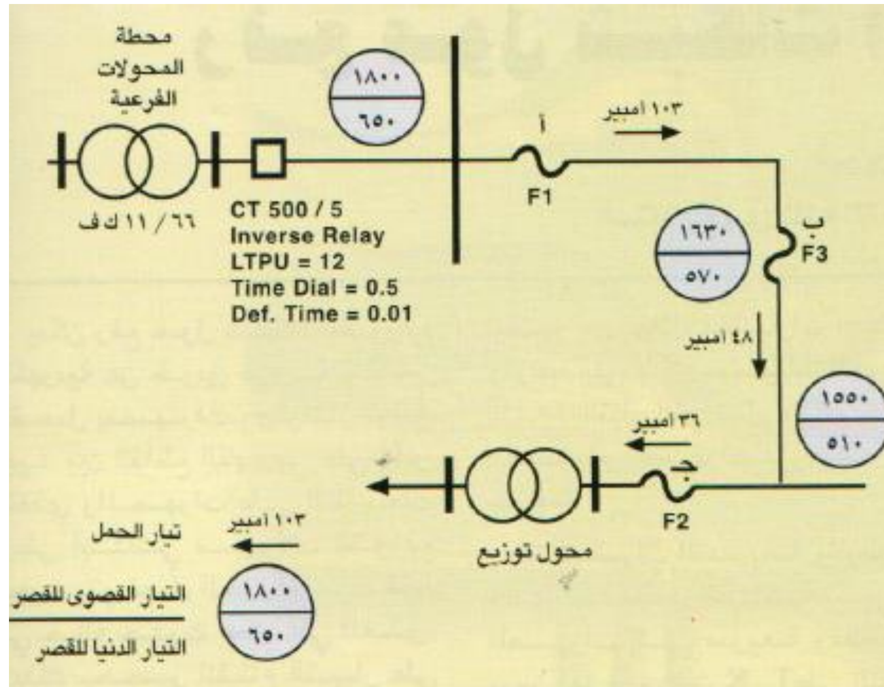


Figure 19-17

ومن خلال هاتين القيمتين سيتم اختيار وتنسيق قيم الفيوزات بإحدى طريقتين:

<u>الطريقة الأولى : باستخدام جداول التوافق</u>

هذه الجداول يتم استنباطها من منحنيات الزمن/التيار التى أشرنا إليها سابقا فى الشكل 19−13. وكل جدول من جداول التوافق التالية يعطى الحدود التى يمكن أن يتوافق فيها كل فيوز واقى مع الفيوز المساند (الذى يليه).

على سبيل المثال فى الجدول 19−3 نجد أن الفيوز الواقى من النوع K له قيم تبدأ من 6A وحتى 140A ، بينما الفيوز المساند له من نفس النوع K له قيم تبدأ من 8A وحتى 200A . فكيف نضمن التوافق بينهما طبقا لهذا الجدول؟

Table 19-2 Type-K fuse coordination

تشعيرة المصهر المساند														تشعيرة المصهر الواقي
200 K	140 K	100 K	80 K	65 K	50 K	40 K	30 K	25 K	20 K	15 K	12 K	10 K	8 K	
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهر A المصهر B (أمبير)														
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	510	350	190		6 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	440	210			8 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	540	300				10 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1050	710	320					12 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	870	430						15 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1100	500							20 K
9200	5800	3900	2800	2200	1350	660								25 K
9200	5800	3900	2800	1700	850									30 K
9200	5800	3900	2200	1100										40 K
9200	5800	3500	1450											50 K
9200	5800	2400												65 K
9200	4500													80 K
9100	2000													100 K
4000														140 K

خذ على سبيل المثال الفيوز 20K (الرمز K هنا لا يعنى كيلو وإنما يعنى نوع Type من أنواع الفيوزات) إذا استخدم كفيوز واقى ، فإن الفيوز المساند له يبدأ من 30K ويمكن أن يستمر التوافق بينهما طالما أن تيار العطل أقل من 500 أمبير (نقصد بالتوافق هنا أن الفيوز الواقى يفصل قبل الفيوز المساند) ، بينما يمكن أن نستخدم الفيوز 40K ويستمر التوافق طالما تيار العطل أقل من 1100 أمبير وهكذا.

لاحظ أن هناك أنواعا مختلفة من الفيوزات حسب المادة المستخدمة فى التشعيرة ، فهناك الفيوزات من النوع K الواردة فى الجدول السابق ، وهى فيوزات سريعة الفصل وهناك فيوزات من النوع T وهى فيوزات بطيئة الفصل كما فى الجدول 19-4 ، حيث يمكن أن ترى أن الفيوز 20T (أى 20 أمبير من النوع T) يتوافق مع الفيوز 30T فى مدى يصل إلى 990 أمبير. لاحظ هنا أنه أبطأ بكثير من الفيوز 20K الذى يتوافق مع 30K حتى 500 أمبير فقط.

Table 19-3 Type- T Fuse coordination

تشعيرة المصـهر المسـاند														تشعيرة المصـهر الـواقـي
200 T	140 T	100 T	80 T	65 T	50 T	40 T	30 T	25 T	20 T	15 T	12 T	10 T	8 T	
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهـر A المصـهر B (أمبيـر)														
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	920	680	350		6 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	800	375			8 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1100	530				10 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1280	680					12 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2500	1700	730						15 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2100	990							20 T
15200	9700	6100	5000	4100	2600	1400								25 T
15200	9700	6100	5000	3100	1500									30 T
15200	9700	6100	3800	1700										40 T
15200	9700	4400	1750											50 T
15200	9700	2200												65 T
15200	7200													80 T
13800	4000													100 T
7500														140 T

فإذا طبقنا هذا الكلام على الشبكة التى ظهرت فى الشكل 19-17 ، نجد أن الفيوز ج مثلا يمكن أن نختار له قيمة تساوى 40T ، وهى قيمة أعلى من التيار الطبيعى خلاله (36 أمبير) وفى هذه الحالة فإن الفيوز ب لكى يتوافق معه يجب أن يكون مساويا 80T وهنا سيكون التوافق مضمونا فى مدى يصل إلى 3800 أمبير ، وحيث أن أقصى قصر يمر بالفيوز ب هو 1630 أمبير فيكون الاختيار مناسبا.

لاحظ أننا لو اخترنا الفيوز 65T فإنه سيكون أيضا متوافقا من الفيوز 40T ولكن المدى يصل إلى 1700 أمبير فقط وهو قريب جدا من قيمة القصر (1630 أمبير) لذا يفضل اختيار القيمة الأعلى.

الطريقة الثانية : باستخدام منحنيات الزمن/التيار

نفس النتائج السابقة يمكن الوصول إليها باستخدام منحنى الزمن/التيار لكل فيوز كما فى الشكل 19-18 . وهذه الطريقة تحتاج أيضا إلى الخطوتين السابقتين (حسابات الـ SC وحسابات Load Flow) فى البداية كما سبق. ثم نستكمل الخطوات كما يلى :

5- الخطوة الثالثة : تحديد نقط الحماية الخاصة بالمحول ، وتشمل:

1- نقطة الـ ANSI التى تمثل أقصى تيار قصر يمكن أن يمر بالمحول ، وهو بالطبع التيار الناشئ عن عطل على أطراف المحول مباشرة ، ويمكن حسابه طبقا للمواصفات من المعادلة التالية:

$$I_{ANSI} = \frac{I_{FL}}{X_{PU}} \times 0.58$$

وتنص المواصفات على أن المحول يجب أن يتحمل هذا التيار لمدة 3.75 sec ، أما المحولات الأكبر فإن الفترة الزمنية تصل إلى 4 ثانية . والهدف من تحديد هذه النقطة هو التأكد من أن جميع منحنيات أجهزة الحماية ستكون جميعا أسفل هذه

النقطة (بمعنى أن تفصل أجهزة الحماية قبل أن يصل تيار العطل إلى هذه القيمة وهذه المدة والتى لا يمكن للمحول أن يتحمل أكثر منهما).

مع ملاحظة أن بعض الشركات تعطى منحنى خاص لكل معدة يسمى منحنى الـ Damage Curve بدلا من حساب هذه النقطة ، فإذا تم استخدام هذا المنحنى فعندئذ يجب أن تكون كافة منحنيات أجهزة الوقاية تقع أسفله لنفس السبب السابق.

2- نقطة تيار الـ Inrush current وهو التيار المرتفع الذى يمر بالجانب الابتدائى من المحول عند بداية إدخال المحول إلى الخدمة ، وقد تصل قيمته إلى 10 أمثال التيار الطبيعى ، وحيث أنه مرتفع إلى هذه الدرجة فيجب أن نضمن أن جهاز الوقاية المختص بالجانب الابتدائى من المحول لن يتأثر بهذا التيار ، بمعنى أن المنحنى الخاص به سيكون أعلى هذه النقطة .

بعد تحديد القيم الهامة السابقة يتم عمل التنسيق بين منحنيات أجهزة الوقاية المختلفة برسمها على ورق Log– Log ، واختيار مقياس رسم مناسب .

والنقطة الهامة التى يجب أن نشير لها هنا أن لدينا أجزاء من الشبكة تقع فى نطاق الجهد المنخفض للمحول وأجزاء أخرى تقع فى نطاق الجهد المرتفع ، وقد يكون لدينا أكثر من محول متتالى فيكون لدينا ثلاثة مستويات للجهد ، وفى كل الأحوال يجب أن يتم توقيع جميع القيم فى ورقة الرسم منسوبة إلى جهد مرجعى واحد Reference Voltage (وليكن الجهد المنخفض مثلا) ، وتستخدم الـ Turns Ratio للمحول لتحويل قيمة أى تيار إلى ما يكافئها فى ناحية الجهد المرجعى الذى تم اختياره.

6- **الخطوة الرابعة** : توقيع النقط الثابتة التى أشرنا إليها فى الخطوة الثالثة على الخريطة منسوبة لجهد الخريطة المرجعى.

7- **الخطوة الخامسة** : رسم المنحنيات الخاصة بأجهزة الوقاية على الخريطة والتأكد من وجود التوافق بينها.

- يفضل دائما أن تبدأ باختيار المنحنى الخاص بجهاز الحماية الأخير (الأقرب للحمل) وأن يكون هذا المنحنى جهة اليسار قدر المستطاع على الخريطة ليفسح المجال لرسم بقية المنحنيات التى تليه.
- ثم بعده مباشرة يفضل أن تختار المنحنى لأبعد جهاز حماية (الأقرب للمصدر) ، ويجب التأكد أنه يقع أسفل منحنى الـ Damage curve للمحول عند المصدر ، لضمان حماية المحول تحت كل ظروف الأعطال .
- ثم بعد ذلك سيتم رسم بقية المنحنيات بينهما.

والشكل 19-18 يعطى نموذجا لنفس الشبكة التى درسناها فى الطريقة الأولى.

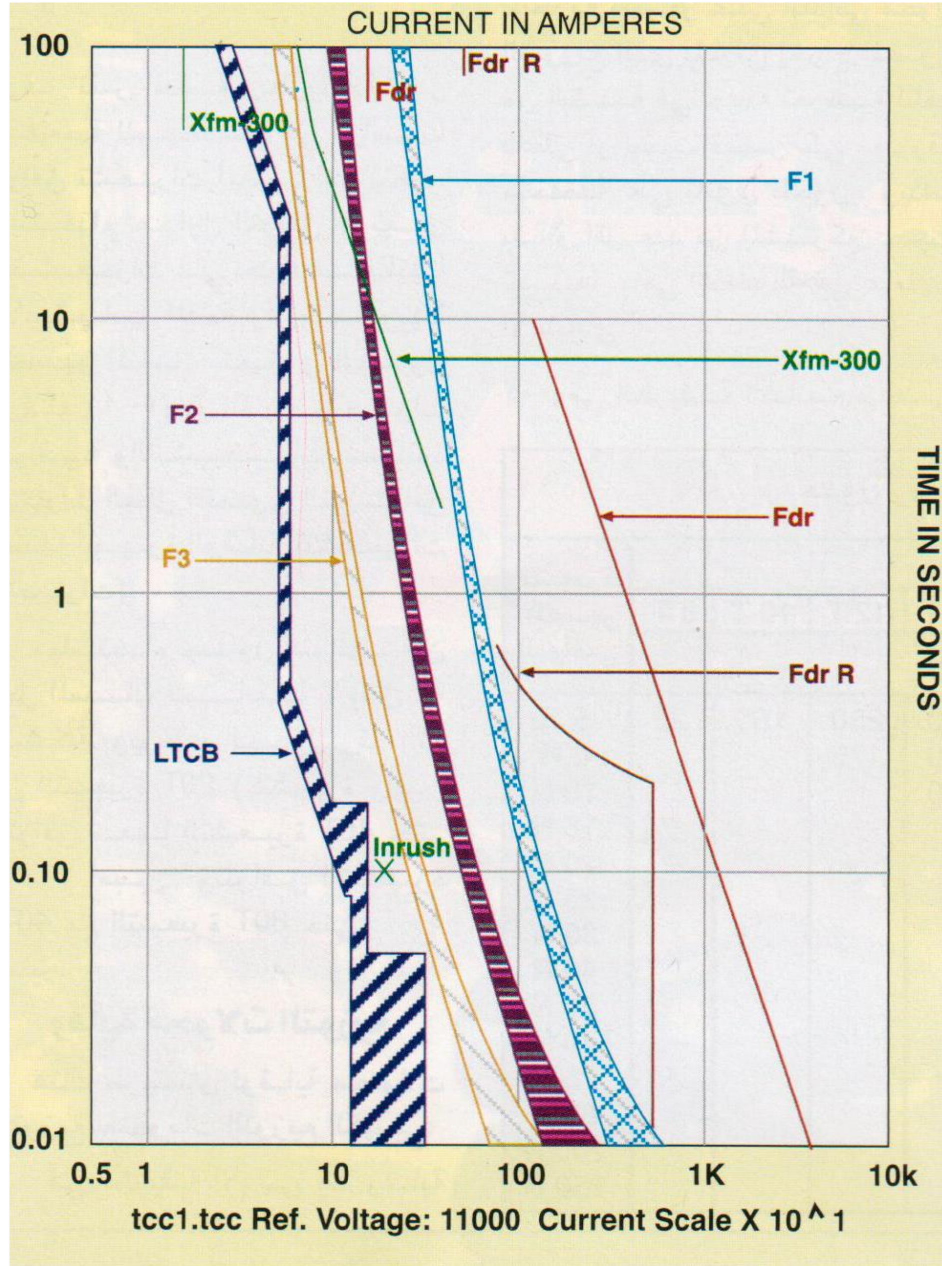


Figure 19-18 coordination curves

19.4.7 ضبط قيم أجهزة حماية محولات التوزيع:

نحن نهدف هنا إلى حساب قيمتين لجهاز الوقاية (سواء كان فيوز أو CB):

1- التيار المقنن
2- سعة القطع

أولا اختيار التيار المقنن لجهاز الوقاية فى جهة الجهد المتوسط:

- بالنســـبة للوقاية فى جهة الابتدائى (جهد المتوســـط) فإن ما يهمنا هو مراعاة تيار الاندفاع Inrush current ، بمعنى أننا نريد التأكد من أن القاطع / الفيوز لن يتأثر بهذا التيار ولن يفصـل المحول بطريق الخطأ. ومن ثم فأنســب CB (إذا اســتخدم فى هذه الجهة) تكون قيمته فى حدود 6 مرات التيار المقنن ، وحيث أن هذه القيمة عالية جدا وسـتجعل القاطع مكلفا جدا ، لذا فغالبا لا نستخدم CBs فى ناحية الجهد المتوسط ، ونستبدله بالفيوز.
- فإذا اســـتخدم الفيوز (ناحية الجهد المتوســـط) فتكون قيمته المقننة فى حدود 1.2-1.5 من قيمة التيار المقنن للمحول ثم نأخذ أقرب أعلى فيوز بعد هذا الرقم (الفيوز بطئ فى الاستجابة لتيارات الاندفاع كما أن قيمة تيار النصـــهار أعلى عدة مرات من قيمة التيار المقنن كما ذكرنا) . ويمكن استخدام الجدول 19-5 لتحديد أنسب فيوز.

Table 19-4

Transformer rated voltage [kV]	25	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3000	3500	Fuse rated voltage [kV]
	Transformer rating [kVA] قدرة المحول ك ف أ — CEF Fuse-link In [A]																				
3	16	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250[1]	315[1]	2x250[1]	2x315[1]					3.6/7.2
5	10	16	25	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250[1]	315[1]	2x250[1]	2x315[1]			
6	6	16	16	25	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250[1]	315[1]	2x250[1]	2x315[1]		
10	6	10	16	16	16	20	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	2x160	2x200	2x200	12
12	6	6	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	2x160	2x200	
15	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	2x100	2x125		17.5
20	6	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	2x100	2x100	24
24	6	6	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	2x100	
30	6	6	6	6	6	10	10	16	16	16	25	25	25	40	40	2x25	2x40				36
36	6	6	6	6	6	10	10	10	16	16	25	25	25	40	40	2x25	2x40	2x40			

IEC 60787 جدول لتحديد سعة فيوز الجهد المتوسط حسب قدرة المحول طبقا للمواصفات الدوليه

- بالنسبة للوقاية جهة الثانوى يفضل أن نستخدم CB قيمته فوق التيار المقنن مباشرة كما فى الجدول التالي:

قدرة المحول	القاطع (جهد منخفض)
250KVA	400 أمبير MCCB
500KVA	800 أمبير MCCB
1000KVA	1600 أمبير ACB
1500 kVA	2500 أمبير ACB
3200 kVA	3200 أمبير ACB

ملحوظة:

ليس معنى أننا نستخدم فيوز فى جهد الجهد المتوسط أن الفيوز لا يتأثر بتيار الاندفاع ، فالحقيقة أنه يتأثر لكن بدرجة أبطأ من الـــــــ CB . والجدول 19-6 يبين المدى الزمنى الذى يتحمله الفيوز نتيجة ارتفاع التيار مؤقتا (سواء بسبب تيار الاندفاع فى المحولات أو بسبب تيار البدء Starting Current فى المحركات)

لاحظ مثلا أن الفيوز جهد 12kV وتياره المقنن 100 أمبير يمكنه تحمل تيار عالي قدره 224 أمبير لمدة 5 ثوانى أو تيار قدره 180 أمبير لمدة 20 ثانية وهكذا دون أن يبدأ فى الانصهار.

Table 19-5 Fusing times

U_n	I_n	Dimension "L"		Starting–up periods in seconds					
kV	A	mm	A	5	10	20	30	40	60
7,2	63	292	I_f	210	190	170	160	155	145
			$I_{r\,max} = k \cdot I_f$	118	106	95	90	87	81
	80		I_f	300	270	240	230	215	205
			$I_{r\,max}$	165	148	132	126	118	113
	100		I_f	400	360	320	300	285	270
			$I_{r\,max}$	224	201	179	168	159	151
	63	442	I_f	220	200	180	170	165	160
			$I_{r\,max}$	132	120	108	102	99	96
	80		I_f	300	270	240	230	215	205
			$I_{r\,max}$	180	162	144	138	129	123
	100		I_f	370	330	300	280	265	250
			$I_{r\,max}$	222	198	180	168	159	150
12	63	557	I_f	220	200	180	170	165	160
			$I_{r\,max}$	132	120	108	102	99	96
	80		I_f	300	270	240	230	215	205
			$I_{r\,max}$	177	159	142	136	127	121
	100		I_f	380	340	305	285	275	260
			$I_{r\,max}$	224	200	180	168	162	153

مثال :

محول 1000 MVA (جهد 11/0.4) ، احسب التيار المقنن للوقاية المركبة فى الجانبين.

الحل:

- تيار المحول المقنن جهة الابتدائى = 52 A ، وتيار المحول جهة الثانوى = 1443A
- وطبقا للقواعد السابقة يكون أنسب وقاية فى الابتدائى هى فيوز 63 أمبير
- فى الجانب الثانوى يكون أنسب وقاية هى 1600 CB أمبير

ثانيا خطوات حساب سعة القطع لجهاز الوقاية :

1- احسب التيار المقنن للمحول

$$I_{rated} = \frac{MVA}{\sqrt{3}\,V}$$

2- احسب تيار القصر I_{CU} وطبقا للتعريف (هو قيمة أكبر تيار القصر فى الظروف العادية) فإنه يساوى:

$$I_{CU} = \frac{I_{rated}}{Z_{PU}}$$

3- قيمة سعة القصر للقاطع تحسب ليس حسب قيمة I_{CU} بل تحسب حسب قيمة I_{CM} وهو يمثل قيمة تيار القصر الذى يمر بالقاطع إذا تم غلقه على قصر موجود بالشبكة (وهذا ظرف غير عادى وأصعب ولذا تياره أكبر من التيار الأول I_{CU}) . والعلاقة بينهما تحسب هكذا

$$I_{CM} = n\ I_{CU}$$

حيث قيمة n تحسب من الجدول 19-7 ، ثم نختار سعة القاطع بحيث تكون أكبر من I_{CM}

Table 19-6

$I_{cm} = n \times I_{cu}$

n	قيمة تيار القصر " kA "
1.5	$4.5 \leq I_{cu} \leq 6$
1.7	$6 < I_{cu} \leq 10$
2.0	$10 < I_{cu} \leq 20$
2.1	$20 < I_{cu} \leq 50$
2.2	$50 < I_{cu}$

والجدول 19-8 يعطى قيما محسوبة لتيار القصر جهة الثانوى لمحولات ذات قدرات متعددة حسب الخطوات السابقة.

Table 19-7

Sn	[kVA]	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	قدرة المحول
Ucc (1)	%	4	4	5	5	5	6,25	6,25	6,25	6,25	نسبة المعاوقة
In (2)	[A]	722	909	1154	1443	1804	2309	2887	3608	4547	تيار المحول
Isc (2)	[kA]	18	22.7	23.1	28.9	36.1	37	46.2	57.7	72.7	تيار القصر

لاحظ فى القيم السابقة أنها تمثل الحد الأقصى لتيار القصر بالمحول والواقع أن تيار القصر الفعلى سيكون أقل من هذا حسب نسبة الـــــ Source Impedance التى أهملناها فى الحسابات السابقة على اعتبار أن المحول متصل بشبكة قوية تمثل بـــ Infinit bus وليس لها معاوقة أما فى حال اتصال المحول بشبكة معزولة أو شبكة ضعيفة فلا شك أن تيار القصر سيكون أقل من ذلك.

وفيما يلى بعض المقننات للمصهرات المستخدمة فى حماية بعض المحولات الكهربية ذات القدرات المختلفة وجهود مختلفة . والأشهر هو استخدام المحولات جهد 11kV والتى تجد القيم المناسبة لها تحت قيمة 15 kV على سبيل المثال فالمحول قدرة 500 kVA يحتاج لفيوز قدرة 40 أمبير ، وهكذا.

ملحوظة : الجداول 19-9 هنا كلها من ABB وقد تختلف القيم قليلا حسب الشركة.

Table 19-8 Fuses for different transformers sizes

Transformer rated power [kVA]	Rated voltage of the transformer [kV]				
	6	10	15	20	30
	Rated voltage for the fuse–link				
	7,2	12	17,5	24	36
	Fuse–link rated current [A]				
20	6,3	6,3	3,15	3,15	—
30	6,3	6,3	6,3	3,15	3,15
50	10	6,3	6,3	6,3	3,15
75	16	10	6,3	6,3	6,3
100	20	16	10	6,3	6,3
125	20 or 25	16	10 or 16	10	6,3
160	25	20	16	10	10
200	40	20	16	16	10
250	56	31,5	20	16	10
315	56	31,5 or 40	25	20	16
400	63	40 or 56	25 or 31,5	20	16
500	80	56	40	25	25
630	100	63	56	31,5	25
800	—	80	63	40	31,5
1000	—	100	63	50	40
1250	—	—	—	63	—

والشكل 19-19 يعطى نموذجا للوحات المحولات قدرة 1000 ك ف أ فى مصر ويظهر فيه المهمات الأساسية التى تركب على جانب الجهد المتوسط ، وقيم الفيوزات التى تستخدم فى الجهتين.

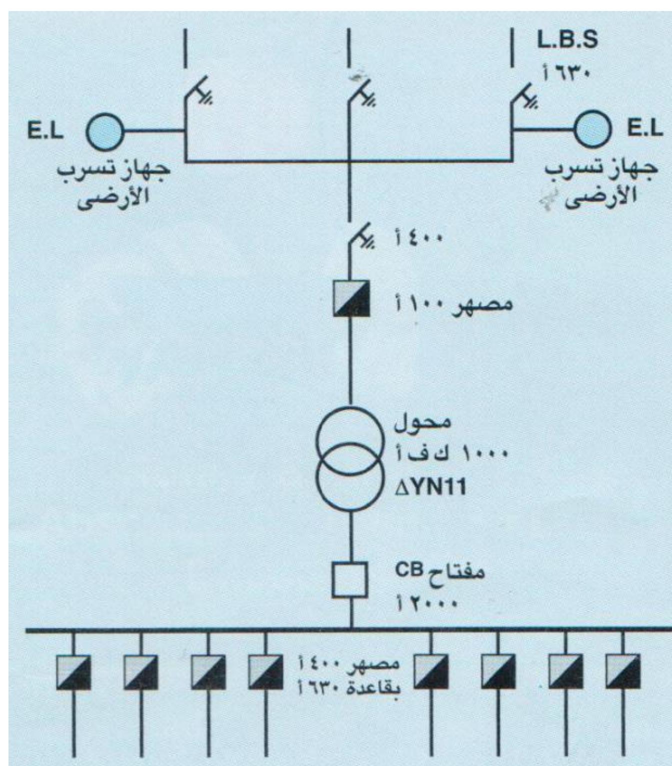

L.B.S
٦٣٠ أ
E.L
جهاز تسرب الأرضى
E.L
جهاز تسرب الأرضى
٤٠٠ أ
مصهر ١٠٠ أ
محول
١٠٠٠ ك ف أ
ΔYN11
مفتاح CB
٢٠٠٠ أ
مصهر ٤٠٠ أ
بقاعدة ٦٣٠ أ

Figure 19-19

19.4.8 حماية محولات التوزيع من الجهود العالية

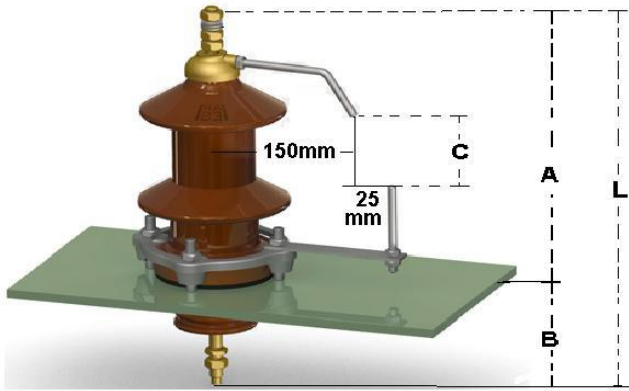


Figure 19-20 Rod Gap

قد يضرب البرق مثلا أحد الخطوط الهوائية ومن ثم تسير الـ Surge على الخط وتحاول الوصول للمحول أو قد يظهر جهد عالي بالخط نتيجة تشغيل مكثفات أو فتح قواطع ، و هذا يمكن أن يؤدى لظهور جهد عالي على محول التوزيع ، ولذا تزود المحولات بما يسمى Rod Gap كما فى الشكل 19−20 ، أو الصورة فى الشكل 19−21 فإذا ارتفع الجهد فجأة بسبب البرق أو غيره كان المرور خلال هذه الـ Gap أسهل من المرور خلال البوشينج Bushing نفسه ومن ثم تكون الـ Gap قد قامت بحماية المحول. ويتم اختيار المسافات فى الشكل السابق من الجدول 19-10.

Table 19-9

الابعاد / الجهد	جهد 12 ك ف	جهد 24 ك ف	جهد 36 ك ف
A	310	385	485
B	117	132	132
C	70	100	200
L	427	517	617



Figure 19-21

19.5 العنصر الثالث فى منظومة الجهد المتوسط: وحدة الربط الحلقية

وتسمى Ring Main Unit, RMU ، وهى مكونة من ثلاثة أقسام ، يقوم القسم الأول منها باستلام الجهد 11 kV القادم من لوحات التوزيع (الموزعات) ، والقسم الثانى يقوم بتغذية المحول ، أما القسم الثالث فيتصل بوحدة حلقية أخرى لتغذية محول آخر كما فى الشكل 22-19.
ومن هنا أصبحت وسيلة التحكم في المحول من فصل وتشغيل بجوار المحول مباشرة كما تم تقليل أطوال الكابلات لكن لا تنس أن مقاطع الكابلات قد تغيرت أيضا وذلك لأن الكابل الواحد صار مسئولا عن تغذية عدد من محولات التوزيع مربوطة مع بعض من خلال الوحدات الحلقية الأخرى.



Figure 19-22 RMU

19.5.1 صناديق التوزيع فى شبكة الجهد المنخفض :

ويطلق عليها المغذيات الثانوية Secondary هي التي تنقل القدرة من محولات التوزيع إلى نقاط الاستهلاك.
وشبكة توزيع الجهد المنخفض تتضمن:

- خطوط هوائية (كما فى الريف) أو كابلات أرضية (فى المدن) .
- أكشاك توزيع
- لوحات توزيع عمومية وفرعية داخل المبانى وخارجها.

وهذه اللوحات(شكل 19-23) تفرض ظروف العمل وضعها في العراء في الأجواء المفتوحة لذا فإن هذا النوع من اللوحات يراعى فيه حماية اللوحة ومعداتها الداخلية من العوامل البيئية فيتم تصنيع هذه اللوحات بإحكام وتكون مدهونة بدهانات خاصة تقاوم العوامل الجوية بجميع ظروفها وتكون مقاومة لتسرب الأتربة ومقاومة


Figure 19-23 صناديق التوزيع

لتسرب المياه. ويتم تركيب تلك اللوحات على قواعد لا تقل عن0.4 متر حتى يسهل تركيب الكابلات من أسفل حتى يسهل التعامل مع أجهزة الفصل بها ويتم إدخال الكابلات إلى تلك اللوحات من خلال جلاند وذلك لمنع تسرب الحشرات إلى داخل اللوحات.

وفى معظم دول الخليج يكون لكل محول صندوق توزيع واحد يسمى Feeder Piller بعدد مخارج يتناسب مع قدرة المحول كما فى الشكل 19-24 بسبب ارتفاع أحمال الفيلات والسكن عموما هناك .

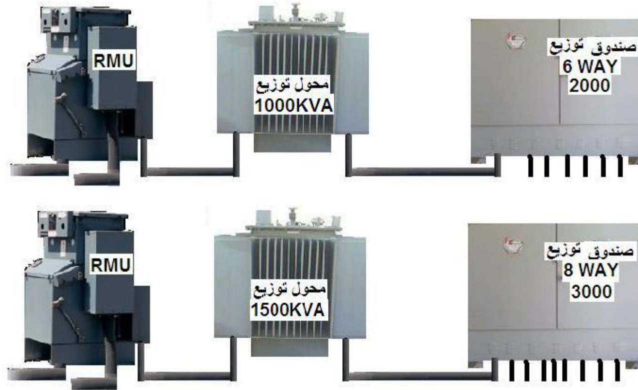


Figure 19-24

أما فى مصر فيمكن أن يتصل بالمحول من 4-6 أكشاك توزيع (معروفة بكشك سيمنس).

والشكل 19-25 يظهر نموذج لأحد أكشاك التوزيع الخاصة بالجهد المنخفض وكل صف رأسي تظهر فيه الثلاثة فيوزات المخصصة لحماية الـ 3-Phase الخاصة بأحد كابلات الخروج أما كابل التغذية فموجود يسار الصورة..

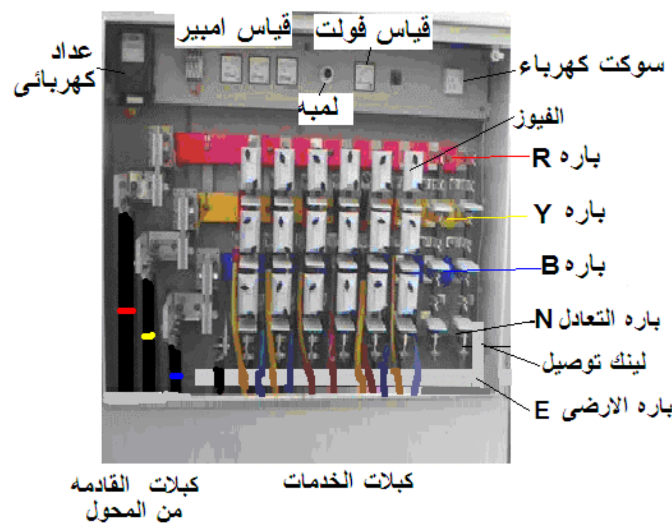


Figure 19-25 Feeder Piller

19.5.2 تنسيق صناديق التوزيع

فى الشكل 19−26 يمثل المحول بمربع أزرق فى المنتصف ، يتصل به أربعة أكشاك توزيع جهد منخفض (مربعات صغيرة) ، لاحظ أن كل صندوق من صناديق امحول الأربعة يتصل بصندوق تابع لمحول آخر من خلال خط منقط (وهذا يعنى أن هذا الكابل الإضافى يكون مفتوحا فى الظروف الطبيعية Normally Open). ويمكن من الشكل أن تكتشف أن بهذه الطريقة يتم تأمين خروج أى محول بنسبة مائة فى المائة ، بمعنى لو خرج أى محول بسبب عطل مثلا فإن صناديقه الأربعة ستوزع على أربعة محولات مختلفة ، ويصبح كل محول محملا بصندوق واحد إضافى.

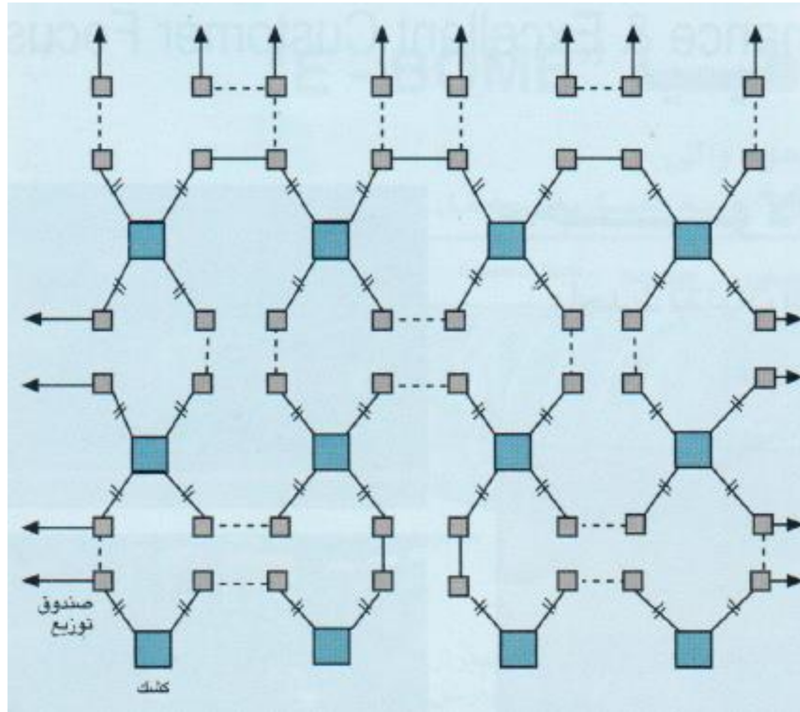


Figure 19-191926 تأمين الأحمال بنسبة 100%

أما فى الشكل 19−27 فالأحمال يتم تأمينها بنسبة 50% فقط.

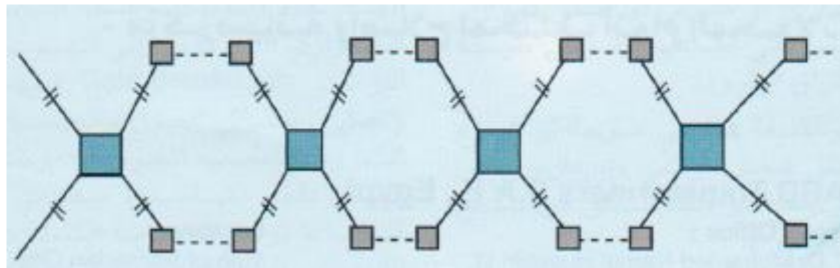


Figure 19-27

وبالطبع فالفيصل فى الاختيار سيكون لأهمية الأحمال والميزانية المتاحة.

20
أنظمة التغذية فى الجهد المتوسط

وظيفة المغذيات أن تصل بين محطة التوزيع الفرعية (الموزع) وبين محولات التوزيع المنتشرة فى أجزاء المدينة المختلفة ، بمعنى آخر أنها تمثل شبكة التوزيع داخل مدينة أو قرية أو مجموعة قرى. و منظومة التوزيع هذه تقع بالكامل فى منطقة الجهد المتوسط .

20.1 أشكال منظومة التغذية

وتتقسم أشكال التوزيع فيها إلى عدة أنواع منها:

20.1.1 نظام الشبكات الإشعاعية

(RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM)

هو أبسط نظام توزيع وأكثره انتشارا في منظومات التوزيع بالقرى والأرياف ، وفيه تكون التغذية دائما من جهة واحدة فقط بينما الأحمال فى الجهة الأخرى.

ويتكون هذا النظام من مجموعة من الدوائر المستقلة التي تخرج من محطة المحولات مباشرة ليغذي كل منها منطقة محددة ، وكل دائرة تتكون من المغذي الرئيسي Primary Feeder وعليه قاطع CB مناسب ، ثم تتفرع منه فرعيات أخري وهي التي تتصل بمحولات التوزيع شكل 20-1، التى تخرج منها فرعيات الجهد المنخفض Secondary Feeders .

وتتصل هذه الفرعيات بالمغذي الرئيسي عن طريق مصهرات (FUSES) حتى لا يتسبب حدوث أي خطأ في الفرعيات إلى فصل المغذي الرئيسي بالكامل ، وأن كان الواقع يقول أن هذا الإحتمال وارد جدا ، فقد لا يشعر الفيوز بالعطل ومن ثم تقع مسئولية فصل هذا العطل على القاطع الرئيسى فى المحطة ومن ثم تخرج جميع المحولات الفرعية المركبة على هذا المغذى.

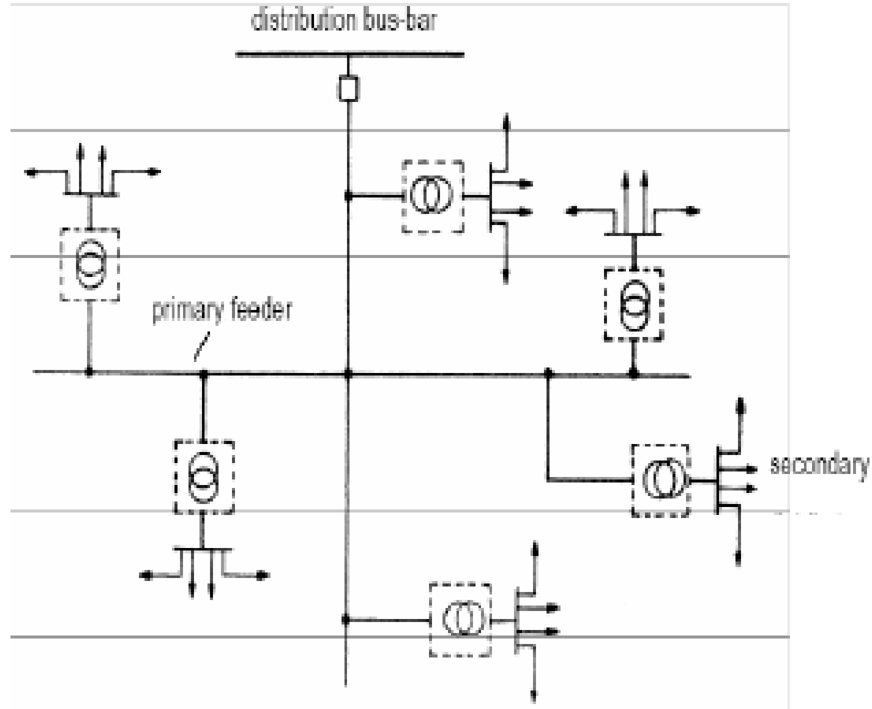


Figure 20-1 Radial system

20.1.2 نظام الـــ Loop المفتوحة

فى هذا النظام يكون للمغذي الرئيسي مسار مغلق يبدأ من محطة التوزيع (الموزع) وينتهي فيها أيضا ، أي أن نهايتي الموزع تكونان داخل المحطة (شكل 20−2) ، ومن ثم فالمغذيات تتمتع بميزة التغذية من جهتين على عكس نظام الـ Radial الذى يتمتع بتغذية من جهة واحدة فقط.

لاحظ أن الموزع نفسه يتم تغذيته من جهتين (خلايا رقم 9 و10 و5 و6) كما فى الشكل ، وهذا أيضا لزيادة الاعتمادية. كما أن الـ BB المستخدم فى الشكل من النوع Sectionalized Single BB وهو الأكثر انتشارا (الخلتين 7 و8 تعتبران خلايا ربط).

لاحظ هنا أن الــ Loop مفتوحة وذلك فى الظروف العادية للتشغيل من أجل تقليل قيمة تيار القصر ، لأنه إذا كان الحلقة مغلقة وحدث عطل فإن تيار القصر سيغذى من جهتين (ومن مصدرين) وهذا يعنى أن قيمة تيار الــ Short Circuit سيكون مرتفعا ، أما إذا كانت الـ Loop مفتوحة فقد جمعنا بين الحسنيين : أن تيار القصر منخفض وفى نفس الوقت هناك مصدر تغذية احتياطى يمكن استخدامه وقت اللزوم فقط وذلك بغلق مفتاح الفصل الموجود فى الحلقة.

ويتكون هذا النظام من فيوزات أيضا على المحولات المتفرعة من الـ Loop (وقد يستخدم CB أيضا) بالإضافة إلى القاطع الرئيسي الموجود فى بداية الحلقة داخل محطة التوزيع (الموزع) والذى يفتح آليا في

حالة فشل الفيوزات فى فصل العطل على الفرع . ويتم تغذية الأحمال بعد ذلك بواسطة الجزء الآخر من المغذي ، لذلك تصميم هذا المغذي يجب أن يتحمل أحمال الجزءين معا.

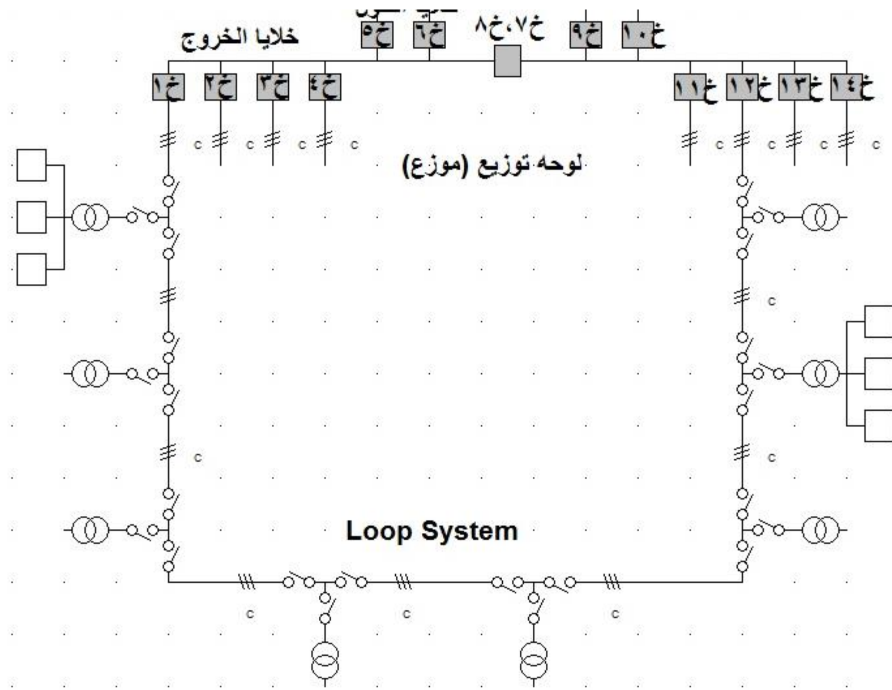


Figure 20-2 Open Ring System

واضح أن العيب الأساسي لنظام Radial السابق قد تلاشي هنا ، وذلك بضمان استمرارية الخدمة للمستهلكين ولكن على حساب التكلفة العالية . وهذا النظام شائع الاستخدام فى المدن الرئيسية فقط. فى الشكل 20-2 السابق لاحظ أن الخليتين خ1 ،خ12 تقومان بتغذية الـ Open Loop مع وجود سكينة مفتوحة فى أحد الأكشاك وذلك لزيادة الاعتمادية فى الشبكة ، فعند حدوث خلل فى أحد الكابلات يتم التغذية من المصدر الآخر.

والمحولات الفرعية فى هذا النظام تكون أكبر حجما من المنظومة السابقة (Radial) فلن تجد فى هذا النظام محولات بقدرة عشرات الـ kVA كما فى السابق .ويرتبط كل محول بالـ Loop من خلال ما يعرف بـ RMU.

وقد تأتى تغذية الموزع جهة اليمين (خ9 و خ10) من محطة توزيع بنما تأتى التغذية جهة اليسار (خ 5 ، خ6) من محطة واحدة ، وقد تكونان من مغذيات من نفس المحطة.

20.1.3 نظام الــ Loop المغلقة

فى هذا النظام تكون الحلقة مغلقة حتى فى الظروف العادية ، وهذا يؤدى لزيادة الاعتمادية فالمغذيات تكون هنا دائمة قادمة من محطتين مختلفتين ، وبالطبع فاحتمالية أن تخرج كلتا المحطتين هو إحتمال ضعيف وبالتالي فالاعتمادية أعلى. لاحظ فى الشكل 20−3 أن المحولات الموجودة فى الـ Loop السفلى مثلا مغذاة من خليتين فى الموزع (Distribution S/S وهذا الموزع نفسه مغذى من خليتين مختلفتين فى الـ Sub Transmission العلوية ، وهذا يعطى مثالا على حجم التأمين لهذه الشبكات التى تجدها غالبا فى القاهرة والاسكندرية فى والمناطق الهامة عموما.

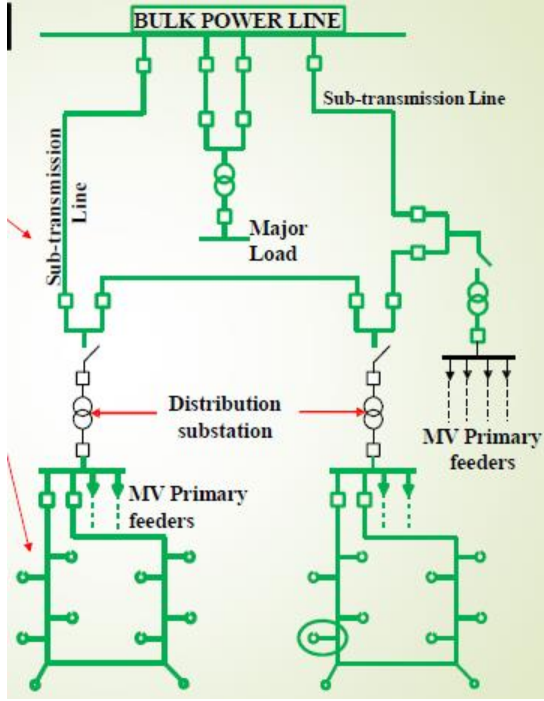


Figure 20-3 Closed Loop system

ويتميز أيضا بأنه الأقل فى المفقودات ففى حالة التغذية الـ Radial يكون التيار فى الـ Sections الأولى من الخط مرتفعا جدا وهذا يتسبب فى ارتفاع قيمة I^2 R . بينما لو كانت التغذية من جهتين فسيتوزع التيار بين الجهتين ولا يتراكم فى الأجزاء الأولى ومن ثم تقل المفقودات .

ويترتب على تحسن المفقودات أن يتحسن أيضا توزيع الجهد فلا تجد انخفاضا شديدا فى نهاية الخط كما فى حالة الـ Radial system

لكن بالطبع كل هذا على حساب التكلفة العالية ولذا لا تجد هذا النظام تقريبا فى مصر لكنه شائع فى دول الخليج. وأهم شئ فى هذا النظام أنه يحتاج إلي Synchronization .

لكن نظام الـ Closed Loop هو الأساسي فى منظومات الجهد الأعلى بدءا من 33kV فما فوق حيث يتم ربط محطات هذه الجهود دائما بنظام الحلقة المغلقة.

20.1.4 تغذية كبار المشتركين

يوجد عند كبار المشتركين لوحة توزيع أتوماتيكية على الجهد المتوسط أو الجهد المنخفض أو الأثنين معا والتى تعمل بنظام (2 out of 3) كما فى الشكل 20-4 :

ففى الوضع الطبيعى يكون مفتاحين فقط فى وضع توصيل والمفتاح الثالث فى وضع فصل (غالبا المفتاح 3) حتى لا يتم تداخل المصادر مع بعضها . فإذا خرج المغذى رقم 2 مثلا فيغلق المفتاح رقم 3 أوتوماتيكيا . و تحتوى هذه اللوحات على دوائر انترلوك كهربى وميكانيكى لمنع تداخل المصادر.

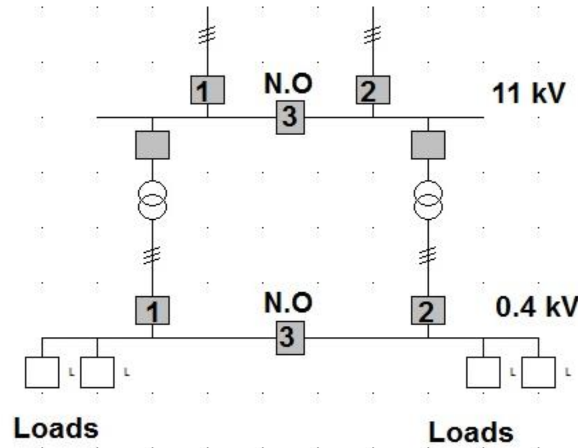


Figure 20-4 two out of three

20.1.5 أنظمة من الواقع

عمليا ستجد أنظمة مختلطة بين كل ماسبق فيمكن أن تجد فى دوائر الموزع الواحد دائرة Radial وأخرى Open Loop ، وربما خليط من أكثر من ذلك. والشكل 20-5 يمثل SLD للوحة موزع منطقة الجامعة فى بنى سويف حيث يستخدم أكثر من نظام كما هو واضح فى الشكل.

لاحظ وجود السكاكين المفتوح التى تصل بين المغذيات الرئيسية والتى تكون كما ذكرنا فى الوضع المفتوح ولا تغلق إلا عند الحاجة للتغذية من الجهة الآخرة نتيجة فصل المغذى الرئيسي

لاحظ فى الشكل السابق أن المحطة تستقبل مغذيان جهد 11 كيلو وموزعين على two Sections وهناك ارتباط(سكاكين مفتوحة) بين المغذيات الفرعية التى تخرج من هذين الجزئين بحيث يمكن تحويل التغذية من قسم لأخر حسب ظروف التحميل والصيانة والأعطال وخلافه.

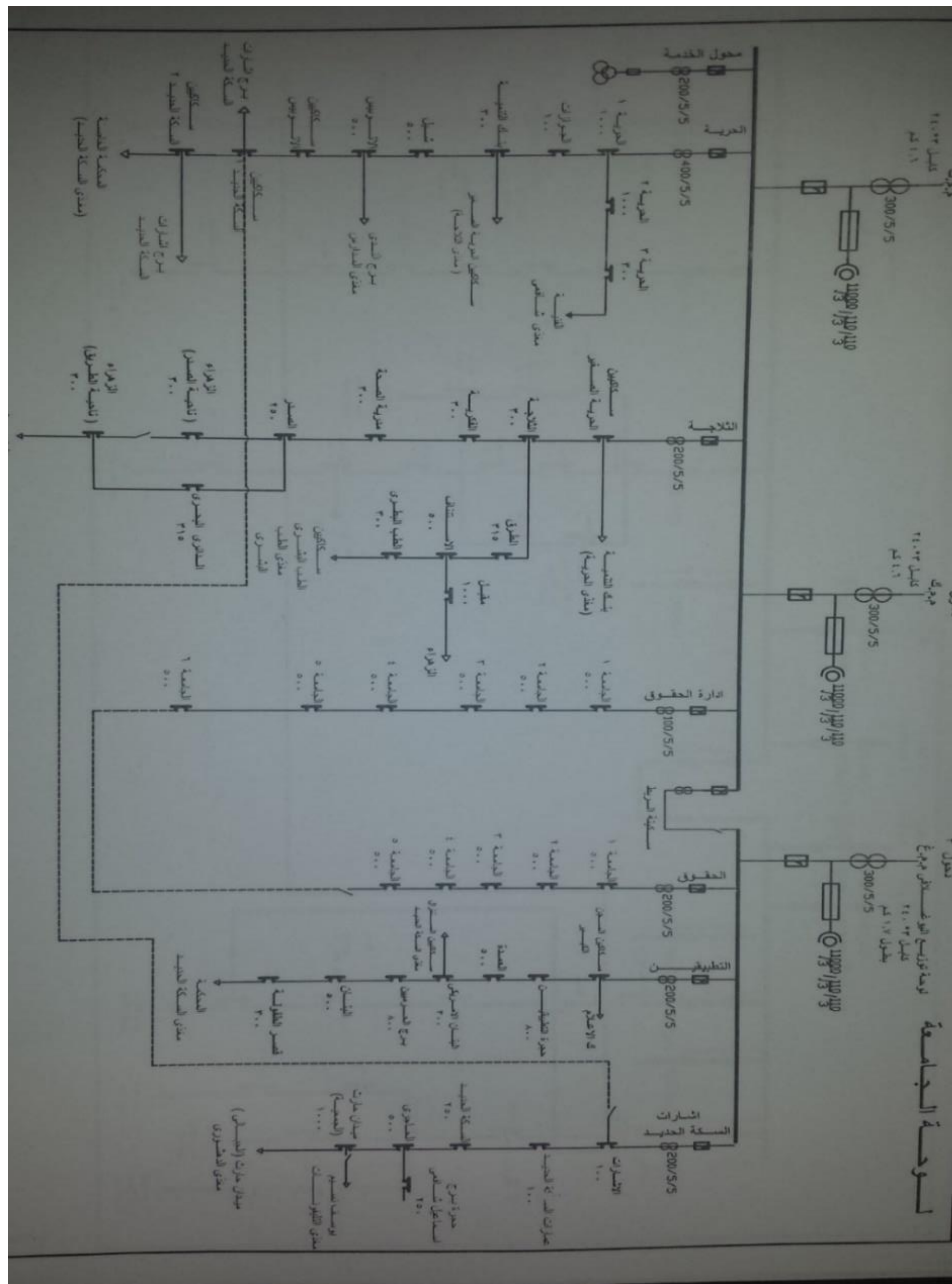
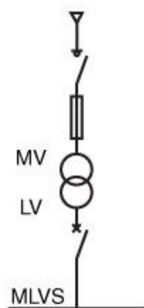
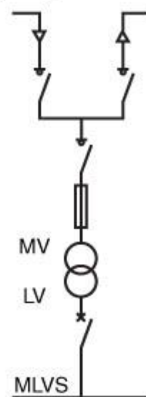


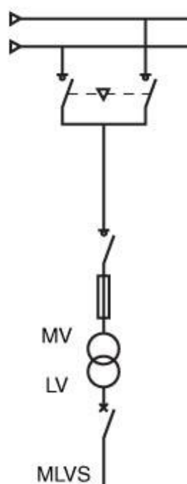
Figure 20-5

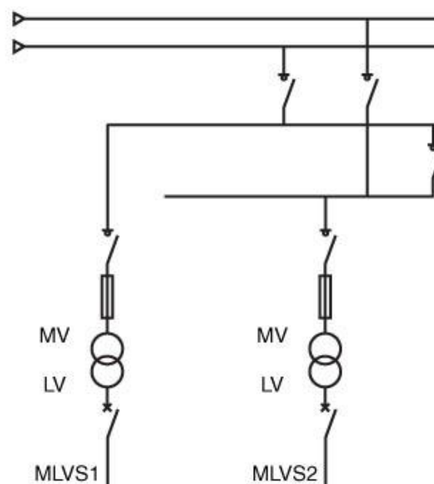
وفيما يلى نماذج لأشكال أخرى لطريقة ربط محولات التوزيع الموجودة عند المستهلك بشبكات التوزيع – غير التى سبق عرضها – وكل واحد منها يمكن استنباط ميزاته وعيوبه من جهة الاعتمادية والتكلفة

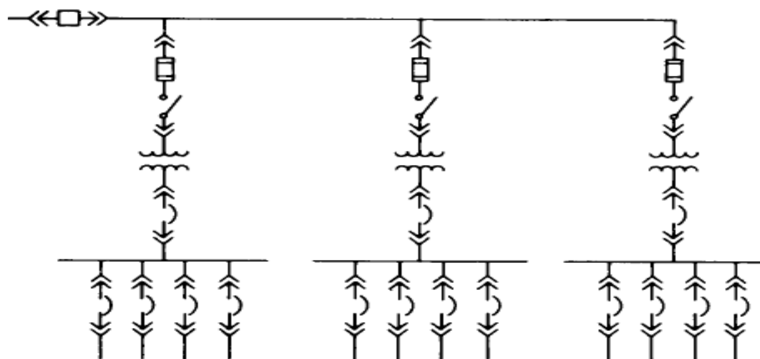
(الأشكال منقولة من كتاب IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution)



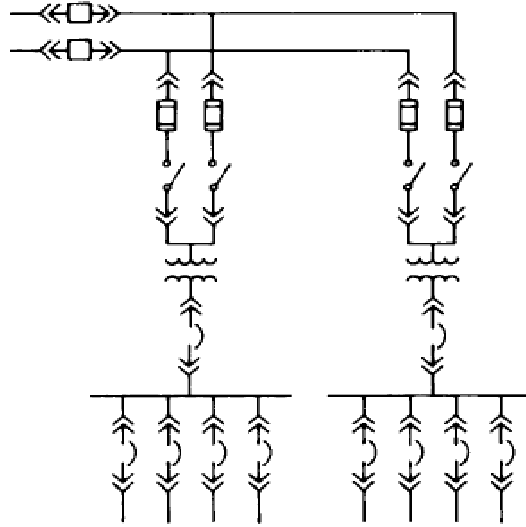




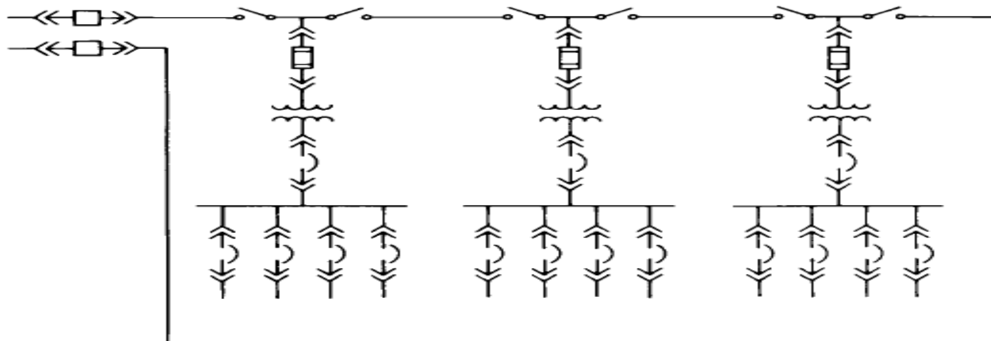




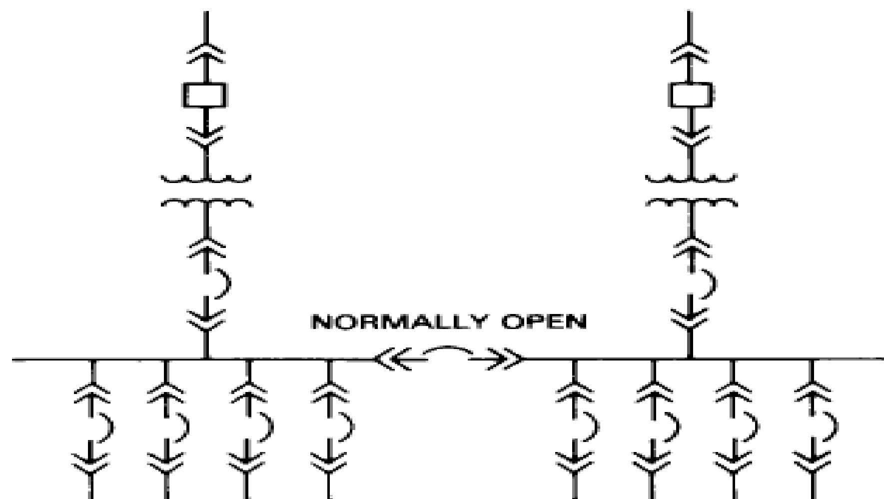
Expanded radial system



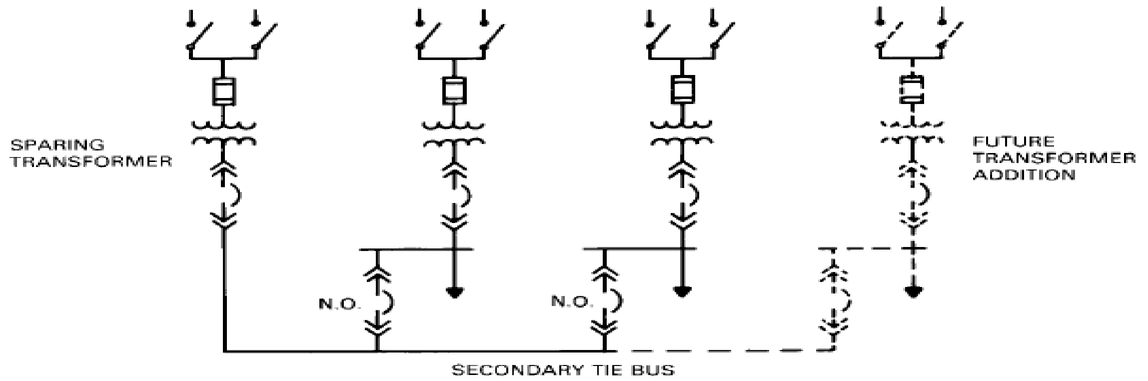
Primary selective system



Primary loop system



Secondary selective system



Sparing transformer scheme

20.2 تأثير دخول التوليد الموزع DG ضمن منظومة التوزيع

منظومة القوى الكهربية التقليدية كانت دائما تمثل بمرحلة توليد يتبعها مرحلة نقل الطاقة ثم التوزيع وانتهاء بالأحمال كما فى الشكل 20-6. لكن

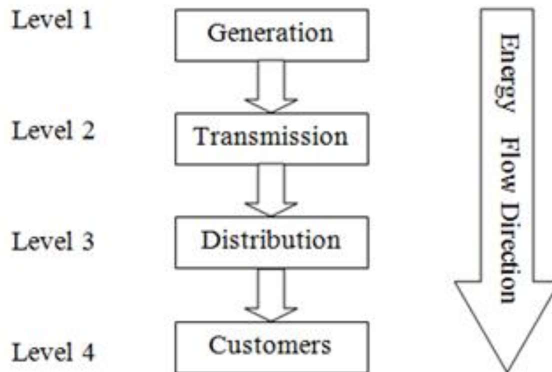


Figure 20-6 Traditional Power Distribution

مع ظهور نظم توليد الطاقة من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة مثل الخلايا الشمسية أو الرياح تغير شكل المنظومة ، فأصبحت المنظومة الجديدة مختلفة فى اتجاه مرور القدرة عن نظم التوزيع التقليدية كما فى الشكل 20-7 حيث نلاحظ أن التوليد صار موجودا فى بداية المنظومة (المحطات التقليدية الضخمة) ، وموجودا فى نهاية المنظومة أيضا بجوار الأحمال (محطات الطاقة الجديدة) .

وساعد على ذلك أن محطات الطاقة الجديدة (ذات القدرات المحدودة غالبا) يمكن تنفيذها بجوار الأحمال مباشرة بل إن بعض هذه المحطات يمكن إنشاؤها فوق أسطح بعض المبانى ، على عكس المحطات التقليدية (ذات القدرات الضخمة) والتى كان من المستحيل أن تنشأ بجوار الحمل.

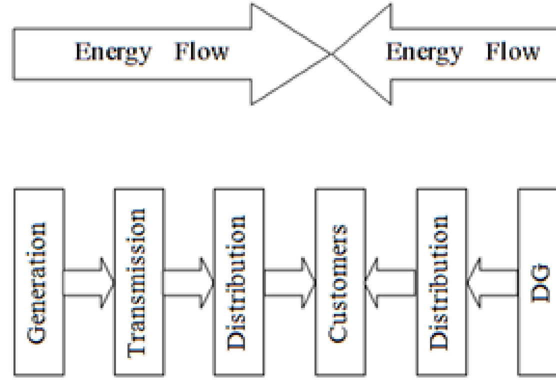


Figure 20-7

20.2.1 ميزات وعيوب التوليد الموزع

هذه الصورة الجديدة لمنظومة القوى جعلت التوليد ليس فقط فى بداية المنظومة بل أصبح التوليد موزعا فى أكثر من مكان بالشبكة كما فى الشكل 20-8 ، ومن هنا ظهر مصطلح التوليد الموزع Distrubuted Generation, DG. كما ظهرت نوعية مختلفة من المشاكل التى تواجهها منظومة القوى لم تكن موجودة بالسابق. وأصبحت هذه المشاكل تمثل مساحة كبيرة من الأبحاث الجديدة فى مجال نظم التوزيع.

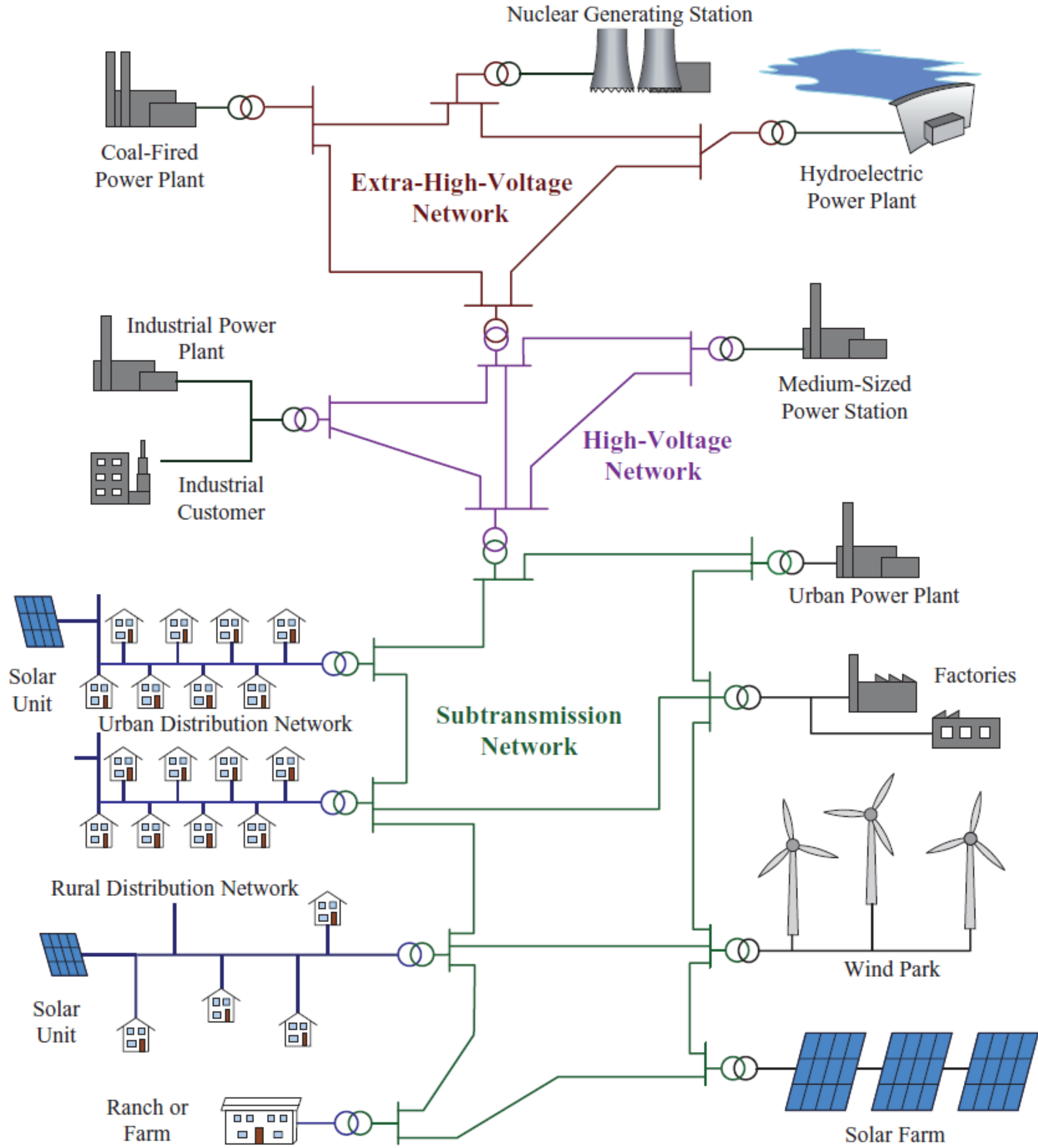


Figure 20-8 التوليد الموزع

وفيما يلى نعرض عددا من المشاكل المرتبطة بنظم التوليد الموزع:

20.2.2 مشكلة الـتـنسيق ـ Coordination

على سبيل المثال فقد ظهر مع التوليد المتوزع DG مشكلة تعقد تنسيق أجهزة الوقاية ، ففى نظم التوزيع التقليدية كان من الممكن ضبط تنسيق أجهزة الوقاية طبقا لترتيب محدد وثابت ، أما فى وجود الـ DG فلم يعد هناك شئ ثابت ، فلا مكان التوليد ولا حتى قيمة التوليد يمكن أن يكون ثابتا ، ومن ثم ظهرت مشكلة

تغير قيمة تيار العطل حتى لو كان العطل فى نفس المكان بسبب التغذية الإضافية القادمة من مصادر التوليد المتوزع المتغيرة القيمة كما فى الشكل 20–9.

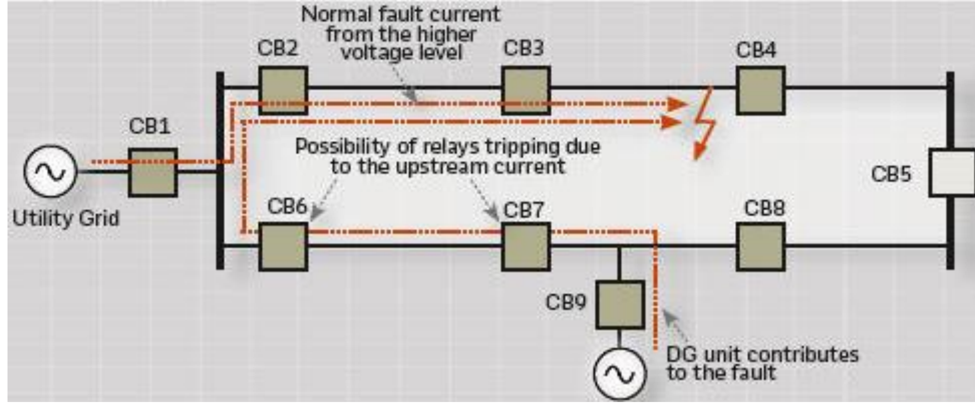


Figure 20-9

ففى النظم التقليدية يمكنك تقدير حجم التنسيق بين أجهزة الوقاية بناء على قيم تيار العطل كما سبق شرحه فى الفصل السابق ، لكن المشكلة الآن أن تيار العطل صار متغيرا بسبب الـ DG.

20.2.3 مشكلة الخطأ فى تقدير مسافة العطل

كما قد تتغير قيمة المسافة المحسوبة بواسطة جهاز الوقاية المسافية حسب وجود أو عدم وجود الـ DG بل حسب نسبة مشاركة هذا الـ DG بسبب تغير قيمة التيار المار بجزء من الخط (ما بين الـ DG وبين العطل فى الشكل 20–10) أثناء العطل عن قيمة التيار المار بجهاز الوقاية ، ومن ثم فستتغير مسافة العطل المحسوبة رغم أن العطل قد يكون فى نفس المكان .

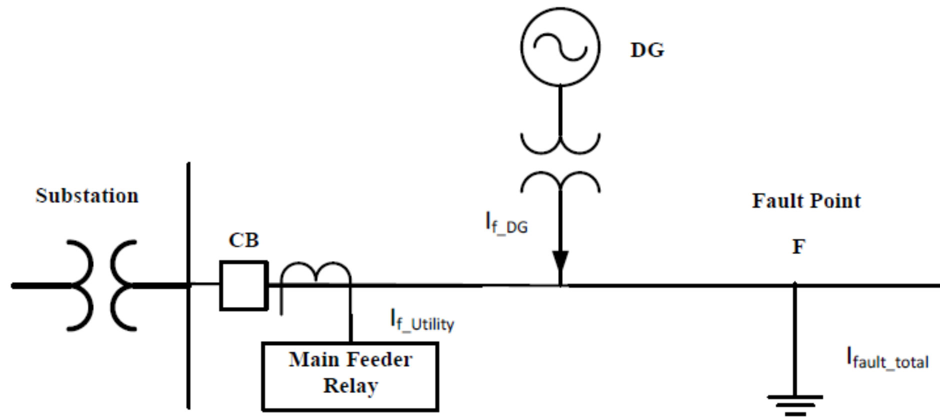


Figure 20-10

20.2.4 مشكلة ارتفاع مستوى القصر

لاحظ من الشكل السابق أن قيمة تيار فى بعض أجزاء الشبكة سترتفع على حسب قوة الـ DG المضافة ، فقبل إضافته كان تيار العطل يغذى من مصدر معين ، لكننا بعد إضافة الـ DG صار لدينا مصدر جديد مما رفع من قيمة تيار العطل ، وهذا قد يتسبب فى تجاوز قيمة الـ Short circuit Capacity لبعض المعدات ، مما يعنى أنها يمكن أن تحترق نتيجة تيار العطل الجديد.

20.2.5 مشكلة الانعزال Islanding

ومن المشاكل الأخرى التى جدت على السطح ولم تكن من قبل مؤثرة مشكلة الـ Islanding ويقصد بها حدوث خروج لمنظومة التغذية الأساسية (شبكة الدولة بعد فتح الـ Breaker A فى الشكل 20-11) بينما تبقى أجهزة التوليد المتوزع DG وكأنها جزيرة معزولة ومسئولة بمفردها عن تغذية الأحمال كما فى الشكل .

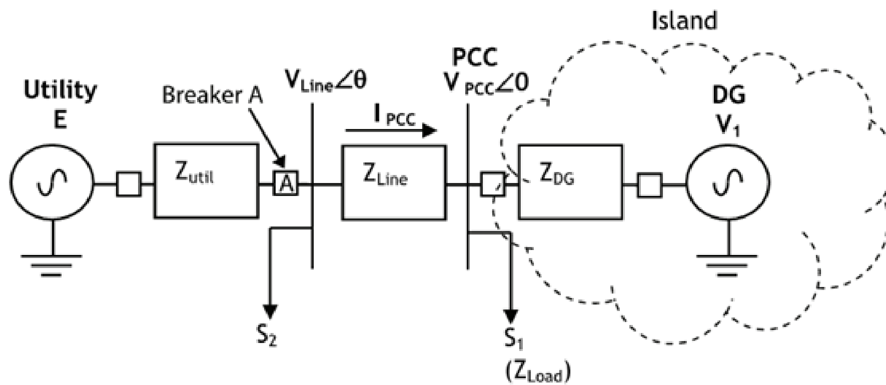


Figure 20-11 Islanding Problem

وهذا الظرف يجب سرعة اكتشافه وفصل أجهزة الـ DG لعدة أسباب منها:

1- قدرة الـ DG أقل من أن تغذى الحمل بعد فصل الشبكة الرئيسية وبالتالي فهناك مشكلة تتعلق بها على أساس أنها Weak Source

2- بعد فتح الـ Breaker A سيظن فريق الصيانة على الخط أن الخط فى أمان طالما أنه لا يوجد تغذية من المصدر ، وقد يغيب عنه أن هناك مصدر آخر وهو الـ DG فى الجهة الأخرى .لاحظ أن هذه المصادر قد تكون موجودة فى ملكيات خاصة وقد يكون مجرد مصدر كبير داخل أحد المصانع ولديه فائض فهو يبيعه للشبكة. المشكلة أن هذا المصدر الثانى غير محدد القيمة ولا المكان ، وقد يجدوه مفتوحا ثم فجأة يدخل للخدمة وبالتالى لا علم لهم بها ولا يوجد

إمكانية لفصل الخط من الجهتين كما فى الأنظمة التقليدية . ولذا كان لابد من اكتشاف حالة الـ Islanding وسرعة فصل الـ DG .

3- فى حالة عدم فصل الـ DG وعدم اكتشاف الـ Islanding ، فإن هناك إحتمال عند رجوع الخدمة من الشبكة العامة أن تحدث مشكلة كبيرة وهى عدم التزامن بينهما Synchronization .

وهناك مشاكل أخرى عديدة ناتجة عن إضافة الـ DG لشبكة التوزيع . و يمكن الرجوع للأبحاث المنشورة فى هذا المجال.

21
شبكات الجهد المتوسط الهوائية

هى إحدى أنواع شبكات التوزيع الثانوية ، وهى آخر مرحلة فى الجهد المتوسط حيث تنتهى هذه الشبكة بمحولات التوزيع ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض. تنتشر الشبكات الهوائية فى مناطق الأرياف بمصر والمناطق الصحراوية ، حيث تتميز بالبساطة وقلة التكاليف ، وسهولة اكتشاف الأعطال وسهولة إصلاحها. والمشكلة الأساسية لها أنها تشوه المنظر ، كما أن نسبة أعطالها أكثر من الشبكات الأرضية .

والغريب أنها الأكثر انتشارا فى الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ، والسبب فى ذلك أنهم يعتمدون مبدأ هاما وهو أنه طالما أن الشبكة الهوائية لا تسبب مشاكل وأعطالها فى الحجم الطبيعى فلماذا نستبدلها بشبكة أرضية أكثر تكلفة؟. والصورة التالية تبين استخدام هذه الشبكات حتى فى الأماكن السكنية.

21.1 أشكال التغذية فى شبكات التوزيع الهوائية

يوجد من الشبكات الهوائية نفس النوعين السابقين : Radial and Ring (Loop) .

21.1.1 أولا الشبكات الإشعاعية Radial

فى الشكل 21-1 نموذج لشبكة توزيع من النوع الـ Radial فى إحدى قرى ريف مصر ، حيث تبدأ الشبكة من محطة محولات 66/11 ك ف (أقصى جنوب غرب الشكل) ويخرج منها مغذى رئيسي

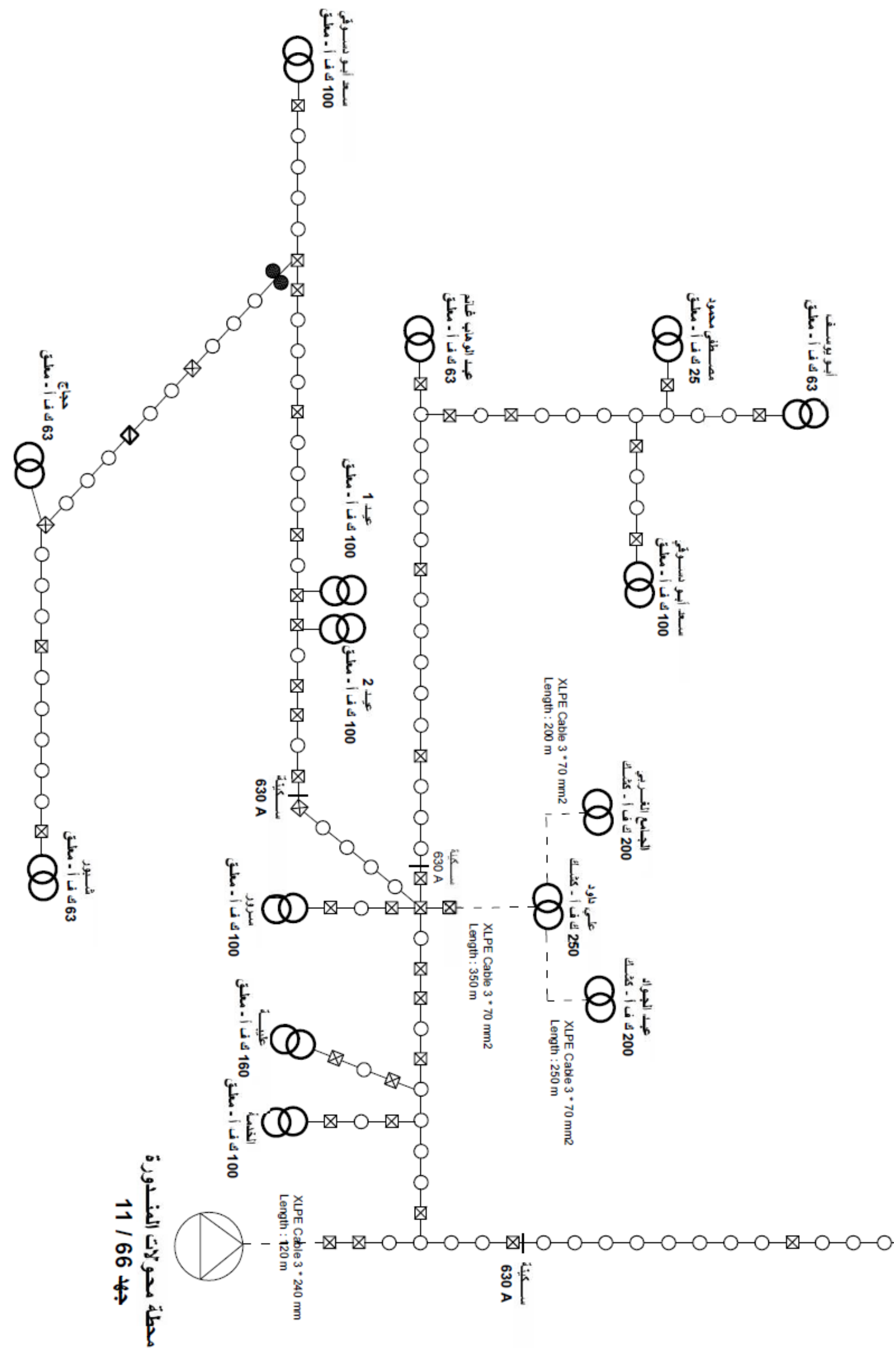


Figure 21-1 شبكة هوائية إشعاعية

يبدأ بكابل أرضى طوله 120 متر (مرسوم بخط متقطع) لزوم الخروج من المحطة الرئيسية فقط) ثم يتصل هذا الكابل مباشرة بالمغذى الرئيسي الهوائى Main Feeder الذى تتفرع منه بعد ذلك مغذيات فرعية كثيرة من نقاط مستقلة تسمى Tap–off لتغذى فى نهاية كل تفريعة أحد المحولات التى تعلق على الأبراج الهوائية ، والتى تتروح قدرتها ما بين 50 إلى 250 كيلوفولت أمبير كما هو واضح من الشكل.

وغالبا تكون الشبكة خليطا من أجزاء هوائية وكابلات أرضية ومحولات معلقة على أعمدة وأخرى مثبتة على الأرض ومتصلة بوحدات الـ RMU.

21.1.2 ثانيا التوصيل الحلقي Ring

نتيجة بعض المشاكل التي تنشأ مع التوصيل الـ Radial مثل انقطاع التغذية عند حدوث عطل في المغذى الرئيسى، ولحل تلك المشاكل وتقليل فترة انقطاع التغذية الكهربية يتم استخدام نظام التوصيل الحلقى Ring حيث تتم التغذية من الطرفين ويكون بينهما نقطة مفتوحة كما سبق أن بينا فى الفصل السابق حيث يعمل هذا النظام على إعادة الكهرباء للمستهلك بعد اكتشاف مكان العطل وعزله.

الشكل 21-2 يوضح شبكة هوائية يتم الربط فيها من خلال وحدة حلقية RMU ، فعند حدوث عطل ما سيتم فصل ذلك المغذى بالكامل عند لوحة التوزيع رقم 1 ، ثم من خلال قسم التشغيل يتم عمل مسح للخط الهوائي بالعين المجردة ، فإذا تم اكتشاف أن أحد العوازل مكسور مثلا فعندئذ يقوم قسم التشغيل بإعادة التغذية إلى الأجزاء الأخرى بعد فصل المنطقة التى بها عطل حسب الخطوات الاتية:

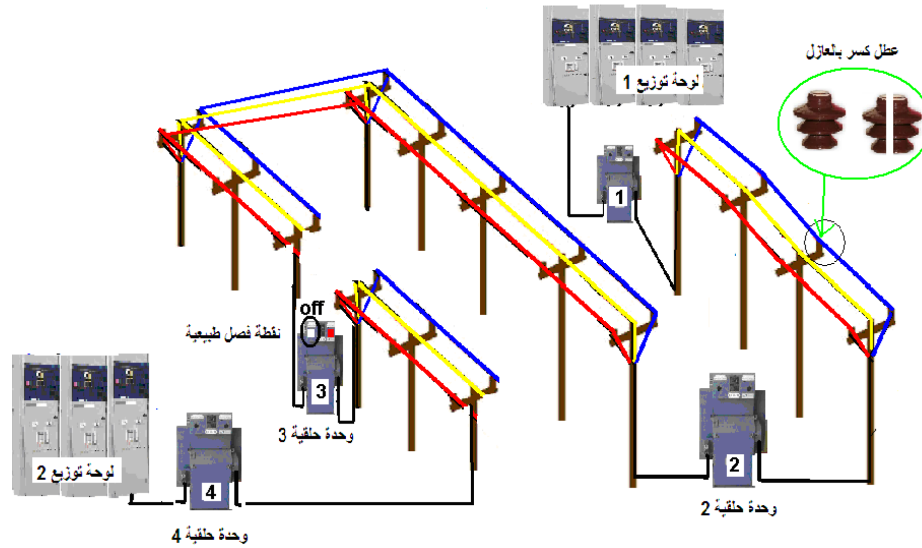


Figure 21-2 RMU in OHD

1- يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 1 ثم عمل تأريض
2- يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 2 ثم عمل تأريض ، وبذلك يكون قد تم عزل المنطقة التى بها عطل.
3- يتم إعادة التغذية من خلال النقطة المفتوحة الطبيعية الموجودة في الوحدة الحلقية رقم 3 .

21.2 العناصر الأساسية فى شبكات التوزيع الهوائية

تتكون الشبكة الهوائية عموما من عناصر أساسية هى :

1- الأبراج
2- الموصلات (الأسلاك الهوائية)
3- العوازل
4- مانعات الصواعق
5- سكاكين الفصل والفيوزات
6- المحولات
7- مبينات الأعطال

وفيما يلى بعض تفاصيل هذه المهمات:

21.3 أبراج شبكة الجهد المتوسط

توجد أنواع متعددة من الأعمدة تستخدم فى شبكات التوزيع منها :

- الأعمدة الخشبية
- الأعمدة الخرسانية
- الأعمدة المعدنية
- الأعمدة الهيكلية

1- الأعمدة الخشبية (شكل 21-3)
كانت شائعة قديما ولازالت منتشرة فى البلاد التى تتوافر فيها الأخشاب لاسيما أن هذا النوع من الأعمدة يتميز بالمرونة فى وقت الرياح ، وهى الأكثر انتشارا فى كندا وأمريكا ، ويتم معالجتها بمواد كيميائية للتغلب على مشكلة العفونة والتأثر بالرطوبة.

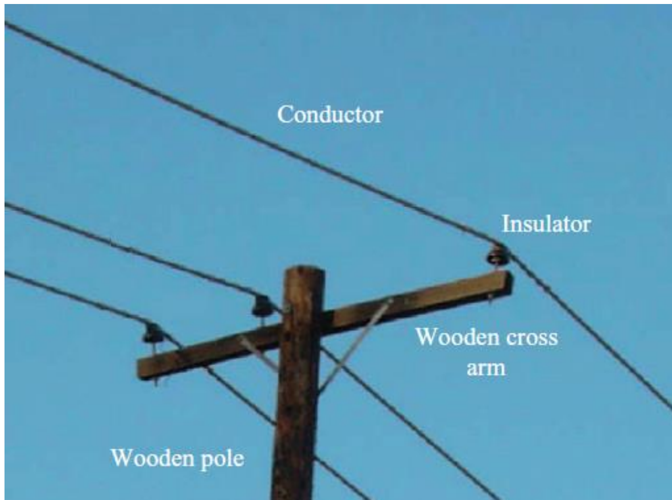


Figure 21-3 برج تعليق فى شبكة التوزيع

2- الأعمدة الخرسانية : هى أعمدة قطرها السفلي أكبر من قطرها العلوي بتدرج إنسيابي وتتحمل قوة شد 1000/750/500/350 كجم طبقا لطرازتها المختلفة وتستخدم للجهود حتى 11kV ومستخدمة في مصر بشكل محدود وأن كانت شائعة فى

دول الخليج لكون مقاومتها الكهربية أعلى من أعمدة الصلب ومن ثم فهى أكثر أمانا. ورغم أنها مكلفة لكنها لا تحتاج لصيانة تقريبا وعمرها طويل مقارنة بغيرها

3- أعمدة مواسير الصلب : تستخدم أعمدة المواسير الصلب في شبكات الجهد المتوسط وهي عبارة عن مواسير من الصلب يتم تنكيلها (طلاء بالنيكل) لزيادة عمرها الافتراضى ، ويقسم طولها إلى ثلاث مواسير متداخلة في بعضها بحوالى 0.25 متر ويستخدم هذا النوع في الجهود حتى 11kV

4- الأعمدة الهيكلية STEEL STRUCTURE TOWER :تتكون هياكلها من زوايا من الحديد المجلفن وتعتبر أفضل من الأنواع السابقة وتتميز بسهولة أعمال الصيانة وتحملها لقوة شد كما أنها تتسم بالثبات بفضل قاعدتها المربعة ، أما الأعمدة الأسطوانية فإنها إذا تعرضت لقوة شد قبل أن تمر فترة كافية على زراعتها وتركيبها فقد تدور حول مركز تثبيتها.

ويمكن تصنيف الأعمدة من حيث مكان العمود فى الشبكة ، كالتالي :

1- <u>أعمدة الوسط (عمود التعليق)</u>

يستخدم حيث تكون قوة شد الموصلات متساوية على جانبي العمود أو حيثما لا يكون هناك تغير في اتجاه الخط فيتم تركيبها فى المسارات المستقيمة من الخط (شكل 21-4) وتمثل 80% من إجمالى أعمدة الخط. وفى الغالب تترك مسافة 80 متر بين كل عمودين. وبعض هذه الأعمدة تحمل أيضا محولات التوزيع ولمبات الإنارة أيضا.

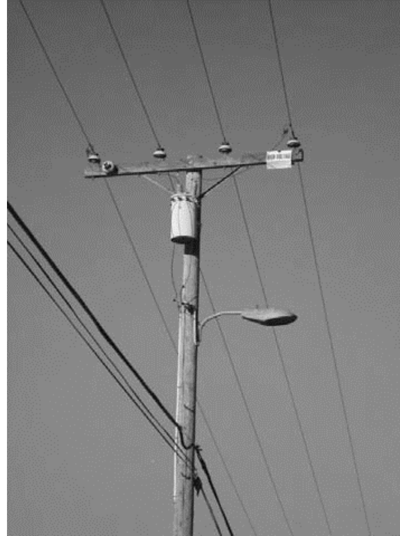


Figure 21-4

2- أعمدة الشد

وهذه تصمم لتتحمل الشد من الجهتين بالأضافة إلى تحمل أوزان الموصلات ، وغالبا يستخدم عمود شد بعد كل خمسة أعمدة تعليق ، وكذلك عند تغيير مسار الخط كما فى الشكل 21-5

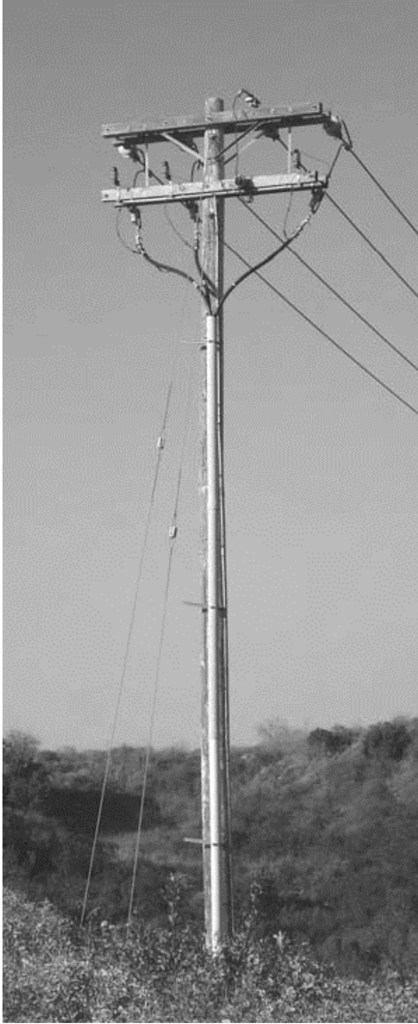


Figure 21-5

عمود بداية أو نهاية الخط الهوائي

تصمم تلك الأعمدة على أنها أعمدة شد من جانب واحد ، وتكون مزودة بعوازل تتحمل قوة شد كما فى الشكل 21-6.

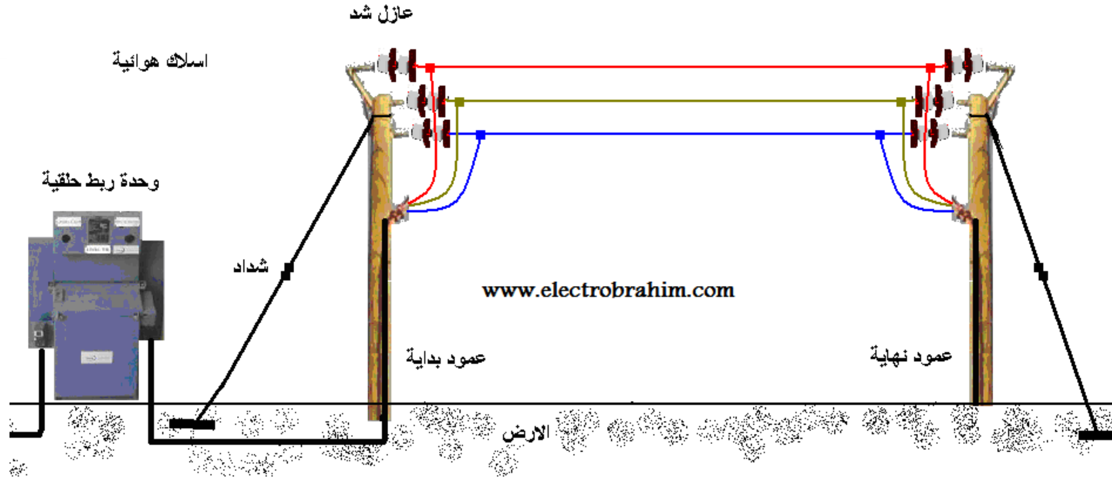


Figure 21-6

21.4 العوازل المستخدمة فى شبكات الجهد المتوسط

وظيفة هذه العوازل هى حمل الموصلات الكهربية ، وعزل الموصلات عن جسم البرج ، وذلك لمنع حدوث قصر بين الموصلات وبعضها ، أو بين الموصلات والأرض . ويوجد منها عدة أنواع حسب نوع مادة العزل ، فمنها العازل الزجاجي والعازل الخزفي (البورسلين) .

وهناك تصنيف آخر طبقا لشكل العازل وتركيبه وهو الأشهر فى تصنيف العوازل ، وتصنف فيه العوازل إلى نوعين : عازل مسمار ، وعازل القرص.

عازل المسمار :

يستخدم ذلك النوع (شكل 21-7) من عازلات الجهد المتوسط لحمل الموصلات فقط دون تحمل أي قوة شد فيستخدم مع أعمدة التعليق فقط.



Figure 21-7 Pin type insulator

عازل قرص suspension insulators

وتسمى أيضا عوازل الطاقية والمسمار والسبب واضح من الشكل 21-8. ويستخدم هذا النوع من العازلات مع أبرج الشد وأبراج الزاوية ، وأعمدة البداية والنهاية ، حيث يركب قرصين في حالة جهد 11kv أو ثلاثة في حالة جهد22kv وتكون مصممة لتتحمل شد الموصلات .



Figure 21-8

عازل السلك الشداد

تستخدم أسلاك صلب لتثبيت الأعمدة كما فى الشكل 21-9. وبما أنها صلب فيمكن أن يتسرب تيار خلالها لذا لاحظ وجود عزل فى وسط السلك الشداد كما فى الصورة لمنع تسرب التيار. وصورته التفصيلية على يمين الصورة.

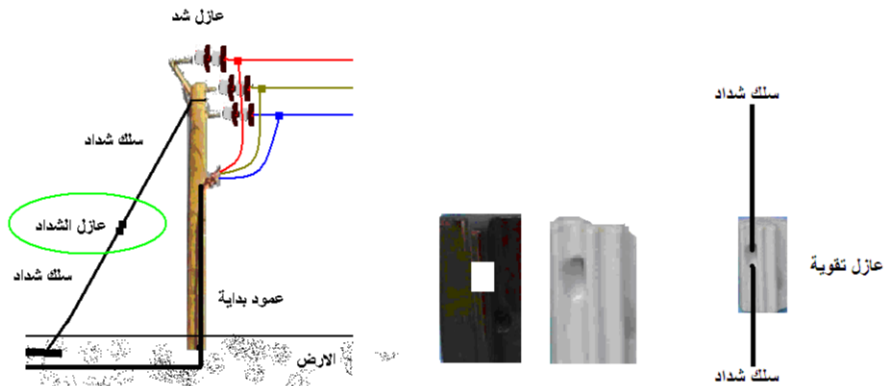


Figure 21-9 سلك شداد

21.5 الاكسسورات المستخدمة فى الشبكات الهوائية

21.5.1 كلامبات الشد Tension clamp

ويتكون من ذراعين ، الذراع الأصغر لا يوجد به مسامير ويكون فى اتجاه الخط الهوائي والذراع الأكبر يوجد به عدد 3 إلى 4 مسامير ، ولذلك يسمى شداد 3 مسمار أو 4 مسمار ويكون فى اتجاه البرج كما فى الصورة. ويجب أن يكون السطح الداخلي للشداد أملس تماما لعدم تجريح السلك أثناء الشد على هذا السطح ، ويفضل تبطين هذا السطح بشريط من الألومنيوم.

الصورة التالية فى الشكل 21–10 تمثل أحد الكلامبات.



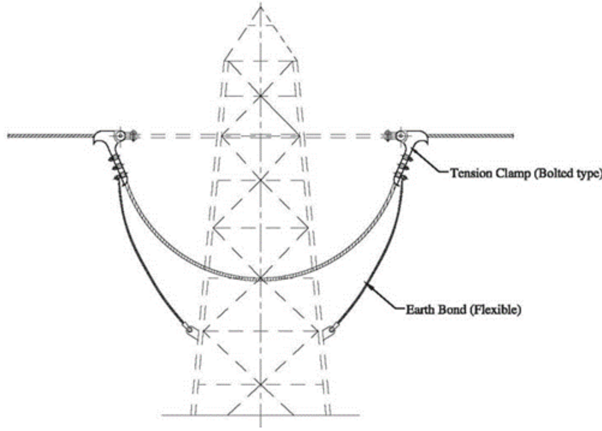


Figure 21-10 كلامبات التعليق

21.5.2 السكاكين

أولا هناك فرق شاسع بين السكينة Disconnecting Switch وقاطع الدائرة Circuit Breaker كما هو معروف ، وهو أن القاطع يفصل على حمل أو على عطل ، وذلك يدويا فى الأحوال العادية ، أو عن طريق أجهزة الوقاية المركبة على الخلية حيث يفصل تيارات الأعطال تلقائيا.

أما السكينة فإنها نوعان :

21.5.3 النوع الأول : السكاكين الهوائية

هذا النوع يفصل في حالة اللا حمل فقط ، و يستخدم في المناورات التي تتم على الخطوط الهوائية سواء للصيانة أو لإصلاح الأعطال أو لتجزئة الخط الرئيسى لتسهيل تحديد مكان العطل حيث يتم تركيب سكينة لكل 3 كم بالخطوط الرئيسية وعند الخطوط الفرعية .

ويتم تركيب السكاكين الهوائية عند بداية الخط الرئيسى وعند بداية التفريعات.

وتتكون من ثلاثة أجزاء (شكل 21–11) :

1- الجزء الثابت وتسمى الأسلحة الثابتة
2- الجزء المتحرك وتسمى الأسلحة المتحركة
3- يد السكينة ومتصلة بماسورة حديد بطول 6 متر لتسهيل عملية الفصل والتوصيل من الأسفل إذا كانت معلقة على عمود.



Figure 21-11 سكينة هوائية

سعة السكاكين المستخدمة

200 أمبير	بالمصـهرات عند التفريعات والمحولات المعلقة
400 أمبير	لتجزئة الخط الرئيسى
630 أمبير	عند بداية الخط الرئيسي

21.5.4 النوع الثانى : Load Break Switch

وهناك نوع آخر من السكاكين يمكنه الفصل على الحمل لكنه لايمكنه الفصل على العطل ، وهو مايسمى Load Break Switch . والنوع الظاهر فى الصورة شكل 21-12 معزول بغاز الـ SF6 (هناك أشكال أخرى عديدة).

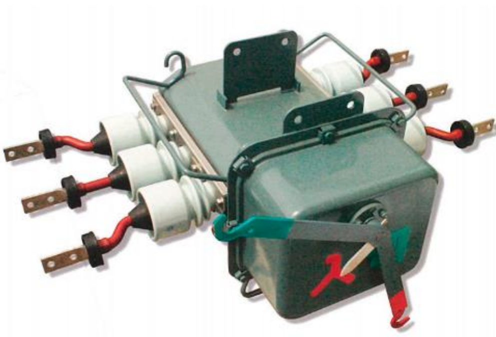


Figure 21-2112 LBS

21.6 الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط

معظم الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون عبارة عن أسلاك مجدولة بطريقة حلزونية ويكون اتجاه جدل الأسلاك فى كل طبقة مخالفا لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة .

وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس ويوجد عدد أنواع من الموصلات الألومونيوم والتي تعطى أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة ولكن من عيوب الألومنيوم أن نقطة أنصهاره منخفضة فيتأثر بدرجة أسرع بتيارات القصر ، ولذا يجب إضافة النحاس أو الصلب للألمونيوم لتحسين بعض خواصه.

وهذه بعض الأنواع المستخدمة من الموصلات.

- موصلات الألومنيوم فقط (ALL Aluminum Conductor,AAC)
- الألومنيوم المقوى بالصلبAluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR)
- موصلات سبائك الألومنيوم All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC)
- الألومنيوم المقوى بسبيكة الألومنيوم Aluminum Conductor Aluminum Reinforced (ACAR)
- سبيكة الألومنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS)

ويتم اختيار مساحة مقطع الموصل طبقا للأحمال المطلوب توصيل التيار الكهربي لها ، وكذلك نوع الحمل حتى لا يؤثر على قيمة الهبوط فى الجهد . وأشهر الأنواع المستخدمة هى الألومنيوم المدعوم بالصلب كما ذكرنا فى شبكات النقل . وأشهر المقاسات المستخدمة فى شبكات التوزيع هى :

6/35 مم2 ، 8/50 مم2 ، 12/70 مم2 ، 15/95 مم2 ، 120 /21 مم2 ، 25/150 مم2

ومعنى 6/35 حسب مواصفات الـ DIN أن الموصل يتكون من جزئين:

- ألومنيوم بمساحة مقطع 35مم2
- الصلب بمساحة مقطع 6 مم2

والجدول 21-1 يظهر بعض خصائص هذه الكابلات وعدد الأسلاك (المقطع الواحد مكون من عدد من الشعرات) المستخدمة من كل مادة داخل المقطع الواحد ومساحة مقطع كل سلكة من هذه الأسلاك.

Table 21-1

Egytech - code	Nominal cross sectional area	Number and nominal diameters of wires		Max. DC. resistance at 20 °C	Calculated breaking load	Approx. overall diameter	Approx. weight
		Aluminium	Steel				
	mm²	nr x Ø (mm)	nr x Ø (mm)	Ω/km	kn	mm	kg/km
a - According to DIN 48204							
AC0-T001-U11	16 / 2.5	6 x 1.80	1 x 1.80	1.8750	5.62	5.4	62
AC0-T001-U12	25 / 4	6 x 2.25	1 x 2.25	1.2060	8.39	6.8	97
AC0-T001-U13	35 / 6	6 x 2.70	1 x 2.70	0.8365	11.92	8.1	139
AC0-T001-U14	50 / 8	6 x 3.20	1 x 3.20	0.5941	16.72	9.6	196
AC0-T001-U15	70 /12	26 x 1.80	7 x 1.45	0.4130	24.97	11.6	276
AC0-T001-U16	95 /15	26 x 2.10	7 x 1.65	0.3058	32.19	13.4	369
AC0-T001-U17	120 /21	26 x 2.45	7 x 1.95	0.2530	41.43	15.7	507
AC0-T001-U18	150 / 25	26 x 2.70	7 x 2.15	0.1939	52.34	17.3	630
AC0-T001-U19	185 / 32	26 x 3.00	7 x 2.40	0.1640	64.78	19.2	762
AC0-T001-U21	210 / 36	26 x 3.20	7 x 2.55	0.1410	73.44	20.5	865
AC0-T001-U20	240 / 40	26 x 3.40	7 x 2.70	0.1188	82.58	21.7	974
AC0-T001-U31	380 / 50	54 x 3.00	7 x 3.00	0.0757	120.90	27.0	1448

Cables - code name	Nominal cross sectional area	Number and nominal diameters of wires		Total cross-sectional area	Max. DC. resistance at 20 °C	Calculated breaking load	Approx. overall diameter	Approx. weight
		Aluminium	Steel					
	mm²	nr x Ø (mm)	nr x Ø (mm)	mm²	Ω/km	kn	mm	kg/km
b - According to BS 215								
Gopher	25	6 / 2.36	1 / 2.36	30.62	1.0930	9.61	7.08	106
Weasel	30	6 / 2.59	1 / 2.59	36.88	0.9077	11.45	7.77	128
Ferret	40	6 / 3.00	1 / 3.00	49.48	0.6766	15.20	9.00	172
Rabbit	50	6 / 3.35	1 / 3.35	61.70	0.5426	18.40	10.05	214
Horse	70	12 / 2.79	7 / 2.79	116.20	0.3936	61.20	13.95	538
Dog	100	6 / 4.72	7 / 1.57	118.50	0.2733	32.70	14.15	394
Wolf	150	30 / 2.59	7 / 2.59	194.90	0.1828	69.20	18.13	726
Dingo	150	18 / 3.35	1 / 3.35	167.50	0.1815	35.70	16.75	506
Lynx	175	30 / 2.79	7 / 2.79	226.20	0.1576	79.80	19.53	842
Caracal	175	18 / 3.61	1 / 3.61	194.50	0.1563	41.10	18.05	587
Panther	200	30 / 3.00	7 / 3.00	261.50	0.1363	92.25	21.00	974
Jaguar	200	18 / 3.86	1 / 3.86	222.30	0.1367	46.60	19.30	671
Zebra	400	54 / 3.18	7 / 3.18	484.50	0.0674	131.90	28.62	1621

وعند إنشاء الخطوط يراعى الآتى : -

1- استخدام الموصلات 6/35 مم^2 ، 12/70 مم2 للخطوط الفرعية بأطوال 5 كم ، 15 كم على الترتيب.

2- استخدام الموصلات 25/150 مم^2 للخطوط الرئيسية لمسافة 20 كم كحد أقصى .

ويجب أن نلاحظ أن الأسلاك تتمدد في فصل الصيف وتنكمش في فصل الشتاء ولذلك عند حساب الطول الكلى اللازم للخط نضيف مترا لكل 100 متر طولى لدواعى الـ Sag الذى يظهر فى الصورة التوضيحية شكل 21-12.

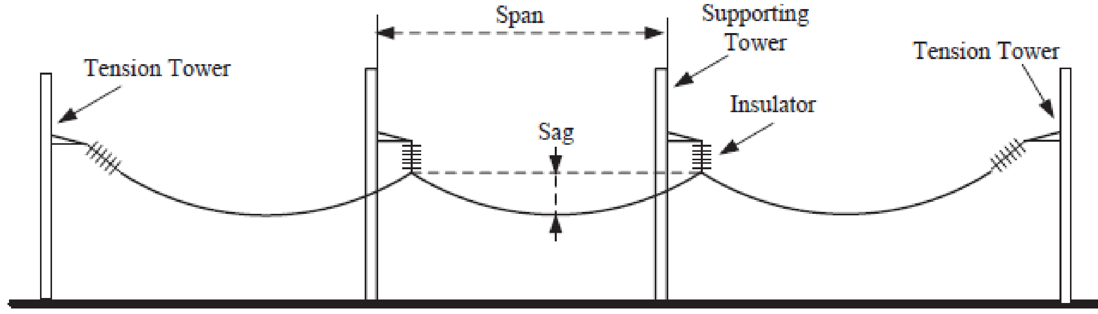


Figure 21-12

وعموما فإن أقل مسافة وهى الموجودة عند أكثر نقطة انخفاضا بين الموصل والأرض فى الشبكات جهد11 kV يجب ألا تقل عن 6 متر ، وإذا تقاطع مع طريق فلابد أن تكون المسافة 8 متر أو أكثر.

21.7أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائى RECLOSER

فى التجمعات الصغيرة مثل القرى والمزارع والصحارى وما يشابهها تكون التغذية دائما عبارة عن خط هوائى لأنه يصعب تمديد الكابلات بالأرض حيث الفلاحين يقومون بعزق الأرض بالفؤوس ، ومن ثم فهناك خطورة من تواجد الكابلات بالأرض ، ولذا يتم نقل الجهد عن طريق الخطوط الهوائية .ونتيجة لأن الأحمال صغيرة فيتم تغذية الأحمال بواسطة محولات تركب على الأعمدة.

والمشكلة في مثل هذه الأنظمة هو تعرض الخطوط لأعطال عابرة مثل حدوث تلامس عابر بسبب الأمطار أو الطيور أو أغصان الأشجار ، وقد تكون أعطال دائمة نتيجة سقوط أحد الأسلاك أو قطع أو إنهيار عزل أحد المحولات الكثيرة المتصلة على الخط .

وحيث أن هذا الخط يكون محميا في أوله فقط من ناحية محطة التحويل الرئيسية بقاطع و أجهزة الوقاية فإن كل عطل من الأعطال السابق ذكرها يؤدى إلى فصل القاطع الرئيسي وهذا يؤدى إلى انقطاع التغذية عن عدد كبير من المشتركين رغم أن العطل قد يكون في واحدة فقط من عشرات التفريعات على الخط.

ولتفادى حدوث ذلك فإننا نستخدم جهاز فصل وإعادة توصيل أوتوماتيكىRecloser شكل 21-13، وهو مشابه للقاطع في عمله، بل هو فعلا قاطع ولكنه يتميز بأنه يمكنه أن يعيد توصيل نفسه (من مرة إلى ثلاث مرات بعد زمن معين) وفى المرة الأخيرة لا يعيد توصيل نفسه .والشكل 21-14 يمثل أداء هذا الجهاز عندما يضبط على فصل وإعادة توصيل لثلاث مرات.

ملحوظة : الصندوق الصغير يمين العمود يوضع به دائرة التحكم فى الـ Recloser .

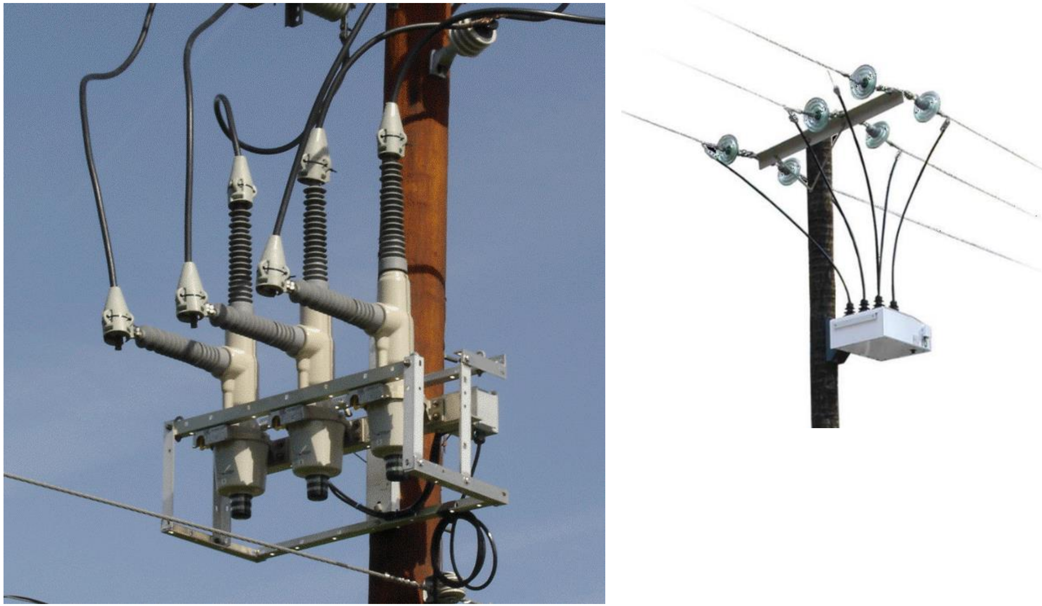


Figure 21-13 Reclosers

عند حدوث عطل بالخط الهوائى يتم الفصل بعد زمن الفصل المحدد (0.3 ثانية لجهاز التفريعة ، 0.5 ثانية لجهاز بداية الخط) ثم يقوم الجهاز بإعادة التوصيل للخط بعد زمن معين (زمن يتم تحديده فى كل مرة توصيل من المرات الثلاث وعلى سبيل المثال 1 ثانية ، 3 ثانية ، 10 ثانية) فإذا تكرر الفصل مرة رابعة فإن الجهاز يقوم بفصل كامل للخط ولايتم الإعادة إلا بعد عمل Reset للجهاز يدويا. والصورة التالية فى الشكل 21–15 تمثل محول ومعه Recloser على عمود توزيع واحد.

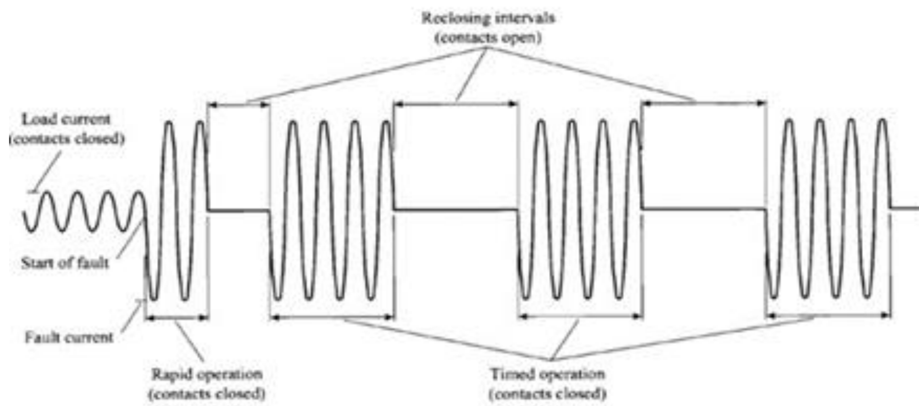


Figure 21-14 recloser timing



Figure 21-15 Transformer and Recloser

21.8 مانعة الصواعق

توضع مجموعة مانعة الصواعق فى بداية ونهاية الخط الهوائى للجهد المتوسط وكذلك عند كل محول. وتوضع أيضا على كل جهاز فصل وإعادة التوصيل الأتوماتيكى recloser ، وعلى منظمات الجهد الأتوماتيكية AVR ، ومكثفات الجهد المتوسط وذلك لتفريغ الشحنة الكهربية للصواعق التى قد تضرب الشبكة الهوائية.



Figure 21-16

وهى عبارة عن مقاومة غير خطية ذات مقاومة عالية فى الأحوال العادية بينما تقل قيمتها عند زيادة الجهد (راجع تفاصيل أكثر عنها فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل). وتتكون مانعة الصواعق من عدد 3 مانعة صواعق (شكل 21–16) تثبت على قمة برجى البداية والنهاية مع توصيل قواعد المجموعة بأرضى جيد.

21.9أجهزة مبينات الأعطال

نظر لطول الخط الهوائى الذى يصل أحيانا إلى أكثر من 50 كيلو متر فإنه يتم تركيب بعض الأجهزة على الأسلاك الهوائية لتعطى علامة بيان على هيئة ضوء أو فلاش عند حدوث عطل بالخط الهوائى ، وذلك لسرعة تحديد الاتجاه الذي تم حدوث العطل به، فالشبكة الهوائية يمكن أن يكون بها تفريعات فى اتجاهات متعددة كما رأينا فى الشكل 21-1 فى بداية هذا الفصل . ويتم رؤية الضوء الصادر من هذا الفلاش على بعد يتراوح بين 300 إلى 400 متر بالنهار أما في الليل يتم رؤيتها على بعد كيلو متر . ويفضل أن يركب ذلك الجهاز(شكل 21-17) بعد التفريعة أو نقطة التقسيم.



Figure 21-17 Fault indicator

ويوجد نوعان من هذه الأجهزة : نوع يركب على الأسلاك الهوائية مباشرة ، ونوع يركب على الأعمدة.

وفكرة عمله أنه عند وجود تلامس ثلاث خطوط مع بعض يتم تشغيل كل أجهزة البيان من نقطة العطل إلى

المصدر لتبين مكان واتجاه العطل أما إذا حدث التلامس بين خطين فإن مبينات الأعطال الخاصة بهذين الـ Two Phases فقط يضيئوا مثل السابق من المصدر وحتى العطل ، ومن ثم يسهل تحديد اتجاه العطل لاسيما إذا كان لدينا شبكات بها تفريعات عديدة. وبالطبع ففى الوضع الطبيعى تكون كافة المبينات مطفأة.

مع ملاحظة أن فكرة هذه المبينات مبنية على مبدأ زيادة التيار ، بمعنى أنه كلما زاد تيار العطل كلما كان الضوء أكثر وضوحا ، فإذا كان تيار العطل منخفضا تصبح هذه المبينات عديمة الفائدة كما فى حالة High–Impeadance faults .

والشكل 21-18 يظهر عطلا من النوع الـ SLG ، وهذا واضح بدليل وجود لمبات فازة واحدة فقط مضيئة من المصدر للعطل. ويتم فصل القاطع لفصل الخط بالكامل مع استمرار إشارة الفلاش على طول الخط من نقطة العطل حتى بداية الخط.

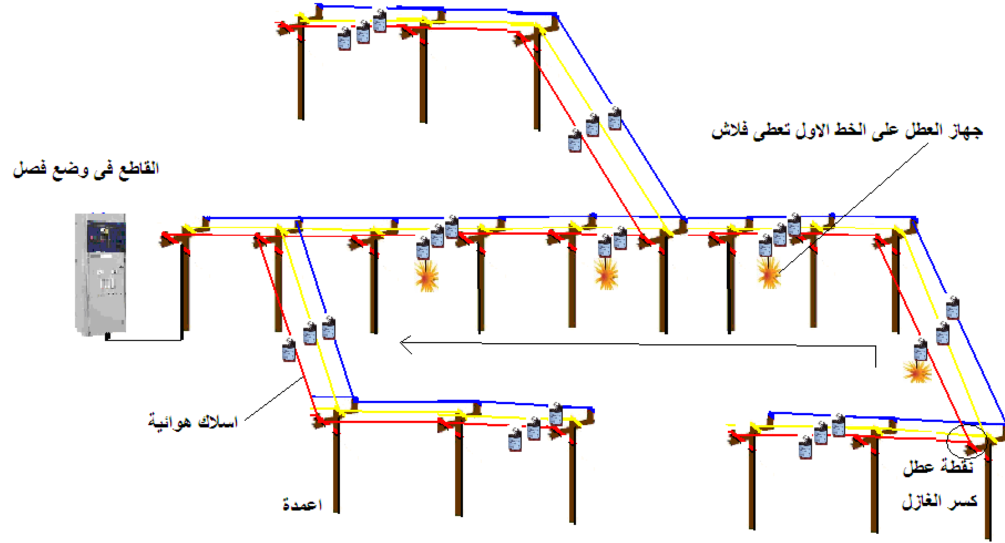


Figure 21-18 مبينات الأعطال فى شبكة هوائية بها عطل على فازة واحدة

ويوجد أنواع أخرى من مبينات الأعطال تعمل من خلال إرسال إشارات لاسلكية (شكل 21-19) لتسهيل الوصول إلى أماكن القصر ، وكل ذلك لتقليل فترات إصلاح الأعطال وتحسين جودة التغذية الكهربية.



Figure 21-19 مبين أعطال لاسلكى

21.10 الأرضى فى شبكات التوزيع



يتم توصيل خط أرضى أعلى الأبراج و تأريضه فى بدايات الخط و ذلك للحماية من البرق و لتفريغ أي شحنات متجمعة بعيدا عن الشبكة. كما فى خطوط النقل وكما هو واضح فى الصورة شكل .

وهذا النوع من الأرضي يسمى أرضي هوائي ، ويستخدم عندما تكون التربة صخرية أو رملية ، وهو عبارة عن موصل رابع بمساحة مقطع 70 مم2 نقوم بتركيبه على الأبراج مباشرة بدون عوازل ، ثم يتم عمل آبار الأرضي عند أبراج البداية والنهاية للخط الهوائي لتوصيل الأرضي بها ، وكذلك كل 1كم طوال مسار الخط.

وفى هذه الآبار يتم تركيب إلكترود نحاس داخل البئر ويربط عند سطح الأرض بسلك نحاس مساحة مقطعة 70 مم2 عن طريق كلمبات و الطرف الآخر للسلك يتم توصيله بالأرضي الهوائي ، ويمكن زيادة عدد الإلكترودات للوصول إلى أقل مقاومة للتربة لتكون فى حدود 5 أوم كحد أقصى.

وهناك أرضى خاص بالأبراج نفسها وهو عبارة عن ماسورة من الحديد الصلب المجلفنة يتم تثبيتها فى الأرض ثم توصيل الطرف العلوي للماسورة بسلك نحاس مساحة مقطعه 50 مم2 والطرف الآخر للسلك يتم تثبيته بالبرج كما فى الصورة شكل 21-20.

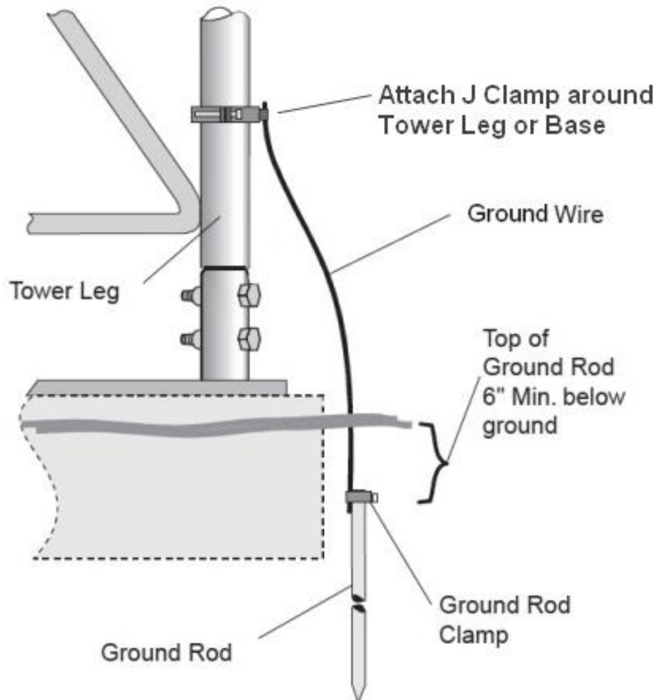




Figure 21-20 Earting poles

21.10.1 الأرضي المؤقت Temporary Earthing

يستخدم أثناء عمليات الصيانة وإصلاح الأعطال ، وذلك لتأمين القائمين على العمل ، فعند القيام بعمل صيانة أو إصلاح عطل بجزء من الخط الهوائى يتم تركيب أرضى مؤقت فى بداية الخط (بداية تغذية الخط) ويتم كذلك تركيب أرضى مؤقت قبل منطقة العمل وتركيب أرضى مؤقت بعد منطقة العمل .

21.11 المشاكل التي تتعرض لها الخطوط الهوائية بشبكة التوزيع

1- انقطاع الكبارى "Jumbers بالخط واحتراقها أحيانا بسبب الرخاوة في الربط حيث تزداد درجة حرارتها بزيادة التيار المار فيها خصوصا إذا كانت هذه الزيادة نتيجة لأعطال متكررة بالخط.
2- وجود أشجار في مسارات الخطوط تتسبب حركة فروع الشجر في عمل قصر بالدائرة الكهربية.
3- نقص العازلية نتيجة لتراكم الغبار على العوازل مما يؤدى إلى انقطاع التغذية.
4- سقوط أعمدة الخطوط نتيجة لهطول الأمطار والرياح أو بواسطة حركة المرور.
5- إنقطاع أحد الموصلات وتلامسه بالأرض من ناحية الأحمال (أعطال عالية المقاومة) مما يتسبب صعوبة فصل المغذى بجهاز الوقاية ويتسبب فى حدوث وفيات نتيجة الصعق بالكهرباء.
6- مرور الخطوط الهوائية داخل المناطق المؤهولة بالسكان .
7- سوء توزيع الأحمال وانخفاض الجهد (لاسيما فى القرى) .
8- نتيجة زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا فى وقت الذروة وارتفاع التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدى لانخفاض الجهد عند المستهلك
9- عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدى ايضا الى زيادة voltage drop
10- وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها او بين الكابلات والبارات حيث انه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة فى هذه المناطق مما يؤدى الى زيادة voltage drop

وأختم الفصل بصورة لتقرير عن شكاوى من المشتركين بسبب انخفاض الجهد فى إحدى القرى ، والحلول المقترحة لذلك ، وهو يلخص كثيرا مما ذكر فى الفصول السابقة.

ملحوظة : فى كثير من شركات التوزيع بمصر تصدر تقارير الأعطال آليا وليس يدويا كما فى التقرير السابق ، فقد تم إدخال نظام scada وإدخال جميع البيانات الخاصة بشبكات الجهد المتوسط والمنخفض. على سبيل المثال تم تجميع البيانات الخاصة بكل كشك من أكشاك محولات الجهد المنخفض ، وهى:

- قدرة المحول المركب داخل الكشك.
- عدد الخطوط الخارجة (السورتيهات) وأسمائها
- اسم الموزع الذى يتغذى منه الكشك.

- اسم المنطقة المتواجد بها.
- عدد الأعمدة المركبة على كل سورتيه
- رقم كل عمود من بداية السورتيه.
- اسم الشارع المتواجد به كل عمود من الأعمدة
- أسماء المشتركين على كل كشك ، وأسماء وعناوين المشتركين على كل سورتيه.

ومن خلال تجميع البيانات الجغرافية السابقة تم عمل قاعدة بيانات كاملة .

شركة لتوزيع الكهرباء

قطاع شبكات

هندسة

السيد المهندس /.رئيس تشغيل هندسة

تحية طيبة .... وبعد

نحيط علم سيادتكم بأنه تم قياس الأحمال والجهود للمحول .أ.م.محمد البنى.

العنوان : قرية كفر البرغامى الناحية الغربية بجوار مسجد جار الله ...

وذلك بناء على الشكوى المقدمة لسيادتكم من ضعف التيار الكهربى بالمنطقة .

وفيما يلى بيان بالأحمال والجهود : جميع المشتركين على فازة واحدة ويلزم شد فازة للمشتركين .

أحمال محول .أ.م.عبدالنبى قدرة ٣٠٠ ك.ف.أ — الجهد على المحول

١٩٠ / ١٩٢ / ١٩١ فولت

N	T	S	R		
٤٣	٩٠	١٣٠	١٢٠	العمومى	الجهد عند آخر مشترك
٤٥	٩٢	١٢٥	١١٠	السورتيه بحرى غرب	١٧٠ فولت

المطلوب عمله لتحسين الجهد بعد فحص الشكوى على الطبيعة :

١- رفع مقطع الجديد خطوة ....

٢- عمل زيادة أحمال على السورتيه البحرى غرب .

٣- شد فازة بطول ٥٠ متر لتوزيع الأحمال .

٤- عمل الصيانة اللازمة للسورتيه البحرى غرب ...

المهمات المطلوبة :

١- .... ١٥٠ متر سلك ٥٠ × ٣ م٢ ....

٢- .... عدد ٢ حوامل ٣٠ .... ٣ عدد ٢ عوازل جرس .

رجاء التنبيه بعمل اللازم

وتفضلوا بقبول وافر الاحترام

قسم الأحمال

22

دراسات هامة فى شبكات التوزيع

هذا الفصل يشتمل على أربعة مواضيع:

1- الاعتمادية وطرق حسابها
2- تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع
3- التحكم فى شبكات التوزيع
4- نظم الاتصالات فى شبكات التوزيع

22.1 الاعتمادية فى الشبكات

فى الأجزاء السابقة تعرضنا لطرق تخطيط شبكات توزيع الجهد المتوسط وكذلك تخطيط الشبكات الثانوية بما تشتمل عليه من محولات وخلافه. والحقيقة أن النماذج التى عرضت تمثل فقط أشهر الطرق للتوصيلات لكن يمكن عمل أشكال أخرى عديدة لربط عناصر شبكة التوزيع سواء فى منطقة الجهد المتوسط أو فى منطقة الجهد المنخفض أو فيهما معا .

والفرق بين هذه الشبكات هو فى نسبة الاعتمادية Reliability المطلوبة وما يترتب على ذلك من تكلفة التصميم فكلما زادت الاعتمادية زادت التكلفة وزاد تعقيد التصميم ، ومن هنا كانت النقطة الأولى التى يجب على المصمم أن يحسمها هى : ماهو شكل الشبكة التى تحقق درجة الاعتمادية المطلوبة ؟

22.1.1 الفرق بين الـــ Reliability& Power Quality"

يجب فى البداية توضيح الفرق بين الاعتمادية Reliability ، و بين الـ Power Quality وذلك لتقارب المفهومين :

- فأما الـ Power Quality "جودة الطاقة الكهربية" فتعنى مدى مطابقة موجة الجهد التى تظهر للعميل للـ ideal sinewave المتعاقد عليها مع الشركة من حيث عدم وجود voltage fluctuations أو تشوه فى شكل الموجة نفسها بسبب وجود بعض الـ harmonics مثلا .
- أما الاعتمادية "reliability فيقصد بها مدى حدوث انقطاع فى الخدمة لمدد تتجاوز الخمس دقائق وذلك طبقا لمقاييس معينة سنتعرض لها فى الأجزاء التالية.
- ملحوظة: إذا كانت مدة انقطاع الخدمة تقل عن خمس دقائق فإنها تعتبر من مشاكل الـ Power Quality وليست من مشاكل الاعتمادية.

مؤشرات الاعتمادية فى الشبكات :

System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء لفترة محددة قد تكون شهرا أو سنة أو حتى يوم واحد و هو الأكثر استخداما لتحديد الـ sustained interruption. ولحساب هذا المؤشر فإننا نقسم إجمالى عدد ساعات الانقطاع على عدد العملاء الكلى . ويقاس SAIDI بالدقائق أو الساعات وغالبا ما يتم قياسها خلال العام.

مثال توضيحى : حدث ثلاثة انقطاعات للخدمة فى يوم 1 يناير وهذه الانقطاعات كالتالي :

1. عدد 10 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 90 دقيقة
2. عدد 1000 عميل تم قطع الخدمة عنهم لمدة 20 دقيقة
3. عدد 3 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 175 دقيقة

وبفرض أن عدد العملاء الكلى 30000 ، إذن تكون قيمة الــ SAIDI يساوى

(10*90 + 1000*20 + 3*175) ÷ 30000 =0.714 دقيقة

Interruption Frequency Index (SAIFI) – System Average

و هذا المؤشر يحسب نسبة احتمالية قطع الخدمة عن اى عميل فى مدة معينة ، ويساوى عدد العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم مقسوما على عدد العملاء الكلى . و من المثال السابق فإنه يساوى = 1013÷ 30000= 0.0337 فى يوم 1 يناير .

Average Interruption Duration Index (CAIDI) – Customer

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم ولحسابه من المثال السابق فبدلا من أن يكون المقام 30000 فإنه يصبح 1013 ، حيث يمثل هذا الرقم إجمالى العملاء الذين تأثروا فعلا بالانقطاعات و بالتالي يصبح الـCAIDI يساوى 21.15 دقيقة

ملحوظة:

CAIDI = SAIDI/ SAIFI

Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI) –

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط عدد مرات فصل الخدمة عند العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم فى مدة محددة ويساوى (عدد مرات فصل الخدمة ÷ عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم)

ومن المثال السابق فإنه يساوى 3 ÷ 1013 = 0.00296

Customer Interrupted per Interruption Index (CIII) –

هذا المؤشر يعطى متوسط عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم عند انقطاع التيار الكهربى . ولحساب هذا المؤشر نستخدم القانون التالي

عدد الأفراد الذين تم فصل الخدمة عنهم مقسوما على عدد مرات انقطاع التيار الكهربى . ومن المثال السابق فإنه يساوى $1013 \div 3 = 337.66$

وهذه المؤشرات التى ذكرناها آنفا هى المقياس الحقيقى للاعتمادية فى اى شبكة والتى ينبغى معرفة قيمتها جيدا حتى يمكننا مقارنة أداء الشبكة فى الوقت الحاضر مقارنة مع أدائها فى وقت سابق لمعرفة ما إذا كان هناك تحسن أم لا . كذلك تساعد هذه المؤشرات فى تحديد أماكن الضعف فى الشبكة والتى ينبغى تحسينها حتى نصل بالأداء إلى أفضل مستوى ممكن .

ولكى تعبر هذه المؤشرات عن أداء الشبكة الحقيقى ينبغى قبل حسابها أن نحذف الأحداث الكبرى major events من بيانات الشبكة التى تستخدم فى استنتاج هذه المؤشرات. وهذه الـ major events لها تعريفات كثيرة و لكن باختصار هى الأيام التى تحدث فيها أعطال كثيرة تزيد عن حد معين يتم تحديده حسب التعريف والتى تكون بسبب مؤثر خارجي عن الشبكة كالزوابع والاعاصير والفيضانات . فالأعطال التى تحدث بسبب من هذه الأسباب لا يمكن أخذها فى الاعتبار فهى لا تعبر بحال من الأحوال عن أداء الشبكة و بالتالي لا يمكن الاستفادة منها .

ومن العوامل الأخرى التى تؤثر فى الاعتمادية فى الشبكات :–

- circuit length فكلما زاد طول الشبكة زادت احتمالية تعرض الخدمة للانقطاع وبالتالي قلت الاعتمادية لهذه الشبكة .
- Circuit configuration فشكل الشبكة من الداخل يؤثر بشكل كبير على الاعتمادية لهذه الشبكة ، فالشبكة الـ Ring مدد الأعطال فيها أقل بكثير من الشبكات الـ Radial.

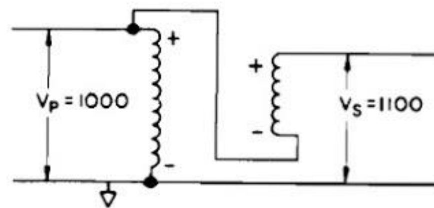
22.2 تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع VOLTAGE REGULATION

تعتبر منظمات الجهد الأتوماتيكية أو الـ (AVR) Automatic Voltage Regulator من أهم وسائل المحافظة على قيمة الجهد ثابتة ، ويتم تركيبها فى المناطق التى ينخفض بها الجهد نتيجة المسافات الطويلة للخطوط الهوائية وخصوصا فى أوقات ذروة الأحمال . وهو يشبه المحول العادى من حيث الشكل الخارجى ، أما تركيبه الداخلى فهو محول من النوع الـ auto Transformer ونستعرضه فى الجزء التالي.

22.2.1 فكرة عمل منظم الجهد

تبنى فكرة عمل منظم الجهد الأتوماتيكى على استخدام محول ذاتى AUTO TRANSFORMER مكون من ملف واحد مقسم إلى جزئين من الملفات على قلب حديدى واحد .
وهناك نوعين من منظم الجهد الأتوماتيكى AVR الأول يستخدم فى شبكة الجهد المتوسط وهو من النوع الميكانيكى فى جزء التحكم كما سنرى ، والثانى يستخدم فى الجهد المنخفض وغالبا يكون التحكم فيه كهربيا وليس ميكانيكيا.
وهناك أيضا فروق فى التركيب فضلا عن الفروق فى الاستخدام. فالـ AVR المستخدم فى الجهد المنخفض يكون الهدف منه حماية المستهلكين من الارتفاع أو الانخفاض المفاجئ فى الجهد. أما حديثا فى هذا الجزء فسيتركز فقط على الـ AVR المستخدم فى شبكات الجهد المتوسط بغرض علاج مشكلة الهبوط فى الجهد .

وفكرة الـ AVR أنه محول مكون كما ذكرنا من ملفين ابتدائى وثانوى مثل أى محول لكن الجديد هنا أن الملفين متصلين ببعض على التوالى بطريقة تؤدى إلى جمع جهدى الملفين معا Boost أو طرحهما Buck ، على سبيل المثال لو لدينا محول 1000/100 فإن الجهد الناشئ من توصيل الملفين معا بطريقة جمعية يساوى 1100 فولت بينما ستكون القيمة إذا وصلا معا بطرية الطرح تساوى 900 فولت ، وهذا يعنى أن هذا المحول يمكنه تغيير الجهد الخارج منه بنسبة 10% زيادة أو نقصان كما فى الشكل 22-1 .



Step-up Autotransformer (Boost)

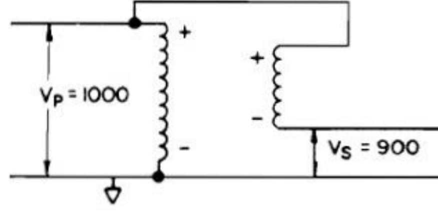


Figure 22-1

Step-down Autotransformer (Buck)

ويمكن إضافة Taps على ملفات الجهد الأعلى ليتم الفصل والتوصيل على درجات وليس فقط بين الأطراف النهائية كما فى الشكل ، مما يعطى مجالا أوسع لتغيير قيمة الجهد فى الجهة الأخرى.

وتتم عملية التحكم فى الفصل والتوصيل لهذه الملفات بطريقة كهربية/ميكانيكية ، فهذه الأجهزة تكون مزودة بمعالج دقيق Microprocessor لتقدير حجم الهبوط فى الجهد ومن ثم تقدير المقدار المطلوب رفعه بواسطة الـ AVR . وبناء على الحسابات السابقة ترسل إشارة إلى محرك كهربى Motor كما فى الشكل 22-2 ليقوم بنقل نقاط التوصيل ميكانيكيا حسب المطلوب سواء بالدوران يمينا أو يسارا وبالتالى يزيد الجهد أو ينخفض.

والأنواع الحديثة تكون أيضا مزودة بنظم اتصالات لتتم عملية التغيير عن بعد وبالتالى التحكم فى الجهد وضبط قيمه أتوماتيكيا.
وغالبا لا تزيد نسبة التغيير المسموح بها فى شركات التوزيع عن ±10% من قيمة جهد الدخول ، ويتم التقسيم على 32 خطوة (16 خطوة منهم بالزيادة و16 خطوة بالنقصان) فإذا قسمت 10% على 16 خطوة ستجد أن نصيب الخطوة الواحدة يساوى 5/8% من قيمة الجهد. ويوجد من هذه الأجهزة نوعان : Single and Three phase Voltage regulators .

والعيب الأساسى لهذه الأجهزة هو البطء فهى تحتاج على الأقل إلى 15 ثانية لتتنقل من توصيلة لأخرى وهذا زمن طويل فى حالة حدوث عارض مفاجئ لكنه مقبول فى الظروف الطبيعية. (ملحوظة : هناك أنواع حديثة يصل سرعة التغيير إلى حوالى ربع ثانية ، لكنها حتى الآن غير موجودة بالشبكة فى مصر).

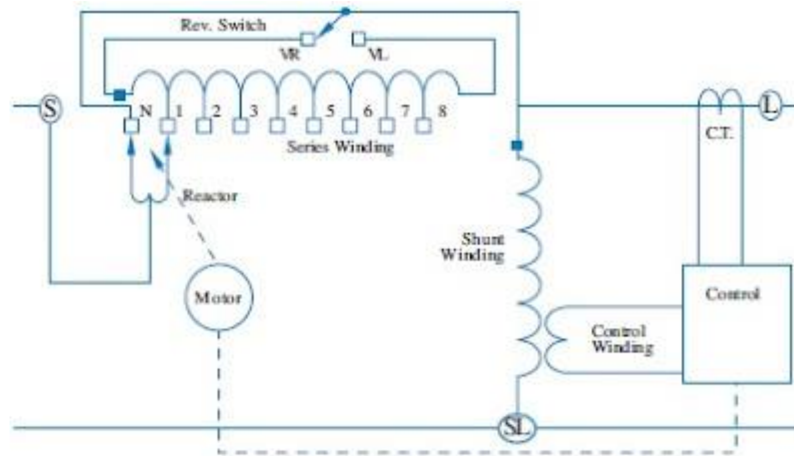


Figure 22-2

Step Voltage Regulator Schematic Diagram

22.2.2 مثال تطبيقى لتقدير حجم الـــ AVR

يقدر حجم الــ AVR بوحدات الـــ KVA فكيف يتم حساب ذلك؟
يحتاج الأمر إلى معرفة نسبة التغيير فى الجهد المطلوبة ولتكن مثلا $\pm 10\%$ ، ثم نحتاج أيضا لمعرفة الجهد المقنن System phase voltage ، ومعرفة قيمة أقصى تيار حمل Max Load current . ثم بضرب الثلاث قيم السابقة معا نحصل على القدرة المقننة للـــ AVR per Phase .

Example:

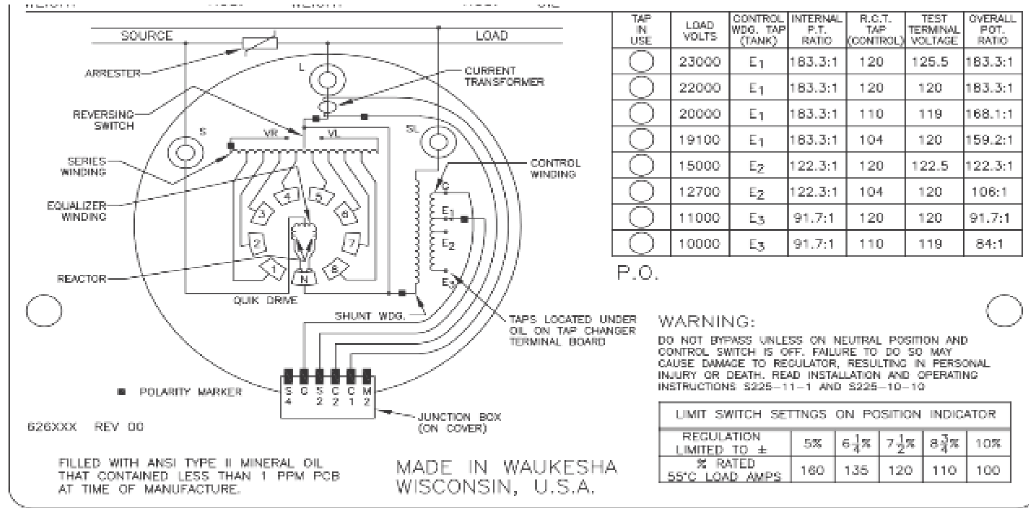
Compute for the step-voltage regulator size needed by a 3-phase, 4-wire multigrounded feeder with a system voltage of 13800Y/7970 V. The required voltage regulation is 10% and the peak connected load is 6.0 MVA.

Solution:

- Voltage regulation = 10%
- Phase voltage is the line-to-neutral voltage = 7.97 kV (since it is a 4-wire multigrounded wye feeder)
- Load current = 6.0 MVA / (1.732 x 13.8 kV) = 251 A
- Voltage Regulator kVA Size = 10% x 7.97 kV x 251 A = 200 kVA

Use three 32-step voltage regulators, each with a standard rating of 250 kVA, 7970 V, ±10% regulation

والشكل 22-3 يمثل مخطط حقيقى لأحد أنواع AVR ويمكن رؤية قيم نسبة التغيير المتاحة حسب نقطة التوصيل فى الجدول الظاهر بنفس الشكل.



TAP IN USE	LOAD VOLTS	CONTROL WDG. TAP (TANK)	INTERNAL P.T. RATIO	R.C.T. TAP (CONTROL)	TEST TERMINAL VOLTAGE	OVERALL POT. RATIO
○	23000	E_1	183.3:1	120	125.5	183.3:1
○	22000	E_1	183.3:1	120	120	183.3:1
○	20000	E_1	183.3:1	110	119	168.1:1
○	19100	E_1	183.3:1	104	120	159.2:1
○	15000	E_2	122.3:1	120	122.5	122.3:1
○	12700	E_2	122.3:1	104	120	106:1
○	11000	E_3	91.7:1	120	120	91.7:1
○	10000	E_3	91.7:1	110	119	84:1

LIMIT SWITCH SETTINGS ON POSITION INDICATOR					
REGULATION LIMITED TO ±	5%	$6\frac{1}{4}$%	$7\frac{1}{2}$%	$8\frac{3}{4}$%	10%
% RATED 55°C LOAD AMPS	160	135	120	110	100

Figure 22-3

وتثبت أجهزة الـ AVR فى الشبكات الهوائية على أعمدة خشبية أو معدنية كما فى الشكل وهى تشبه فى الشكل 22-4 الخارجى المحولات العادية.



Figure 22-4 Voltage Regulator with over head system

أما فى الشبكات الأرضية فيوضع فى صناديق تشبه صناديق التوزيع كما فى الشكل 22-5.



Figure 22-5 Voltage regulator with under ground system

ويمكن مراجعة المزيد عن محولات الـAuto Transformer من كتابى "المرجع فى محولات القوى".

وهذه صورة فى الشكل 22–6 مفصلة للـ AVR .

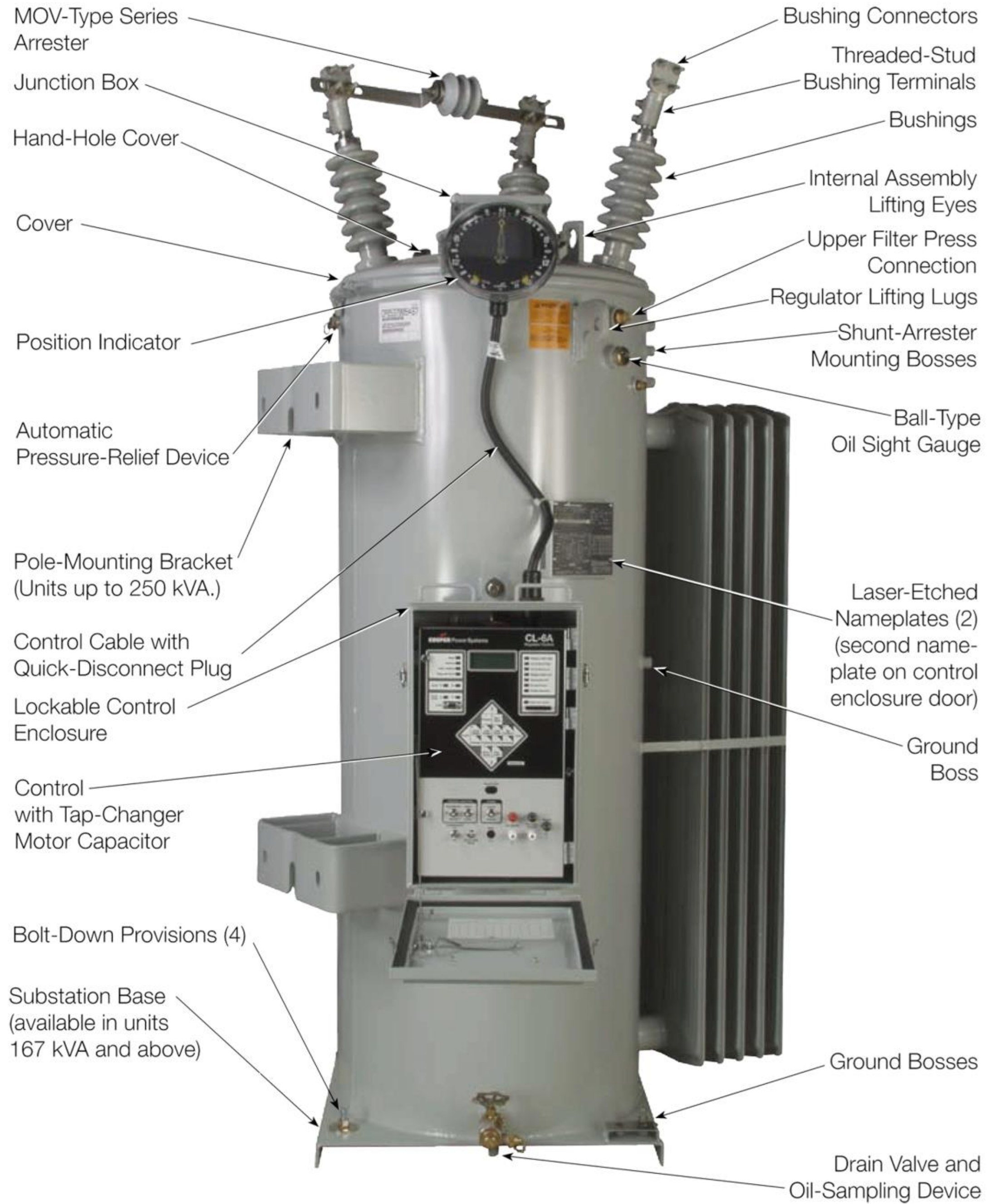

MOV-Type Series Arrester
Junction Box
Hand-Hole Cover
Cover
Position Indicator
Automatic Pressure-Relief Device
Pole-Mounting Bracket (Units up to 250 kVA.)
Control Cable with Quick-Disconnect Plug
Lockable Control Enclosure
Control with Tap-Changer Motor Capacitor
Bolt-Down Provisions (4)
Substation Base (available in units 167 kVA and above)
Bushing Connectors
Threaded-Stud Bushing Terminals
Bushings
Internal Assembly Lifting Eyes
Upper Filter Press Connection
Regulator Lifting Lugs
Shunt-Arrester Mounting Bosses
Ball-Type Oil Sight Gauge
Laser-Etched Nameplates (2) (second name-plate on control enclosure door)
Ground Boss
Ground Bosses
Drain Valve and Oil-Sampling Device
CL-6A

Figure 22-6

22.3 التحكم فى شبكات التوزيع

22.3.1 تعريف الـــ Distribution Automation:

الـ Distribution Automation له عدة مفاهيم ومعانى مختلفة كما أن له العديد من التطبيقات المتنوعة ، فقد نقصد به نظام اتصال على مستوى التوزيع يمكننا من التحكم فى الأحمال وتقليل قيمة peak مثلا ، أو قد يمثل محطة تحكم عن بعد فى محطة التوزيع ذات قدرة على اتخاذ القرارات مثل فتح أو غلق بعض الدوائر.

يوجد نوعان من التحكم فى شبكات التوزيع:

1. التحكم فى شبكة الجهد المتوسط وذلك عن طريق الموزعات. وتتم عمليه التحكم من داخل مراكز للتحكم فى شركات التوزيع المختلفة.
2. التحكم فى شبكات الجهد المنخفض وذلك عن طريق العداد الذكى المركب عند العميل.

يستخدم نظام التحكم سواء في محطات التحويل الكهربي أو فى شبكات التوزيع مجموعة من الأجهزة المختلفة تعمل معا كمنظومة متكاملة. من أهمها :

22.3.2 أجهزة الـــ IED

أدى التطور الهائل فى انظمة المعالجات الدقيقة (Microprocessors) إلى انتشار الأجهزة الذكية المعروفة بـ Intelligent Electronic Devices IEDs ، واستخدامها فى وقاية مختلف عناصر منظومة التوزيع كما فى الشكل 22-7.

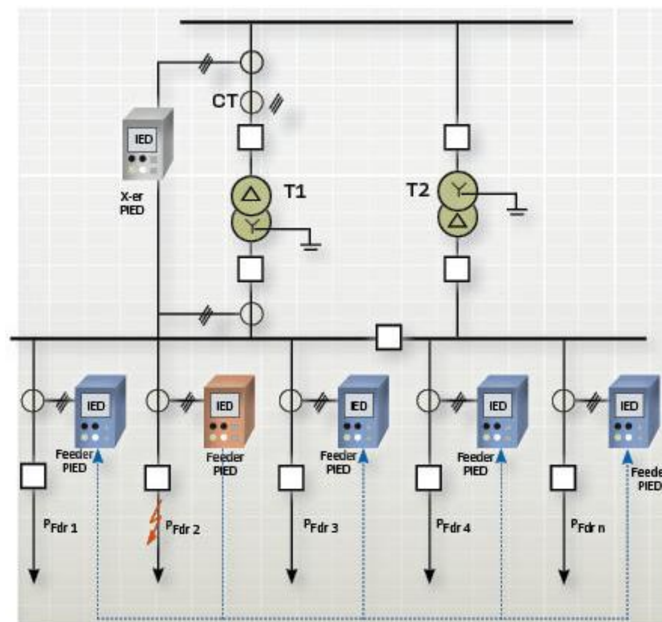


Figure 22 -22 IED usage

وإلى عهد قريب كانت الشركات تنتج هذه الأجهزة ببروتوكولات للتخاطب والاتصال مختلفة ، مما أدى إلى الاعتماد الكلى على الشركة المنتجة فقط في التطور أو التوسع أو الصيانة. ولذا قامت الجمعية الدولية الكهروتقنية IEC المجموعة رقم 57 بإعداد بروتوكول قياسى IEC 61850 لتنظيم إنتاج المعدات الكهربية الذكية وتوحيد لغة التخاطب بينها بحيث يمكن تشغيل معدات مختلفة من شركات مختلفة لتعمل مع بعضها في منظومة واحدة بتوافق تام دون الحاجة إلى أجهزة أو برامج لتقوم بمهمة التوافق بينهما كما كان الحال عند ظهور هذه الأجهزة الذكية.

22.3.3 أجهزة الـــ SCADA

كلمة SCADA ، وهي اختصار لـSupervisory Control and Data Acquisition ، أي نظام للمراقبة والتحكّم وجمع البيانات.

ويقوم مبدأ العمل فى شبكات التوزيع من خلال مراقبة الخطوط والمحولات عن طريق وجود حسّاسات Sensors وأنظمة تحكّم طرفيّة RTU موجودة فى لوحات التوزيع أو لوحات المحولات التى يُراد مراقبتها والتحكم بها، وتكون هذهِ الحساسات مُتّصلة بجهاز الحاسوب المركزي، وعن طريق قنوات اتصال لنقل البيانات إلى وحدة المراقبة المركزيّة التى تستطيع من خلال هذه البيانات معرفة حالة الجهاز الطرفي أو الوحدة الطرفيّة عن بُعد دون الحاجة للمراقبة البشريّة التي بدأت جميع الأنظمة في التخلّي عنها واستبدالها بالأنظمة التكنولوجيّة كنظام سكادا لتوفير الجهد والوقت.

ومن خلال الحساسات والأجهزة الطرفيّة تستطيع أيضاً بالإضافة للمراقبة أن تتحكّم بالوحدات التابعة للنظام؛ كإغلاق خط أو فتحه ، أو أيّة عمليّات تحكّم عن بُعد، فمثلاً يقوم الحسّاس بتوجيه بيانات رقميّة عبر شبكة سكادا، وتصل إلى الجهاز المركزي بأنَّ هُناك ارتفاع في درجات الحرارة للمحول الفلانى، فيقوم عندها العامل البشريّ بالتدخّل إما بتخفيف الحمل أو إرسال فرق الصيانة.

والشكل 22-8 يمثل نموذجا لمنظومة الـ SCADA.

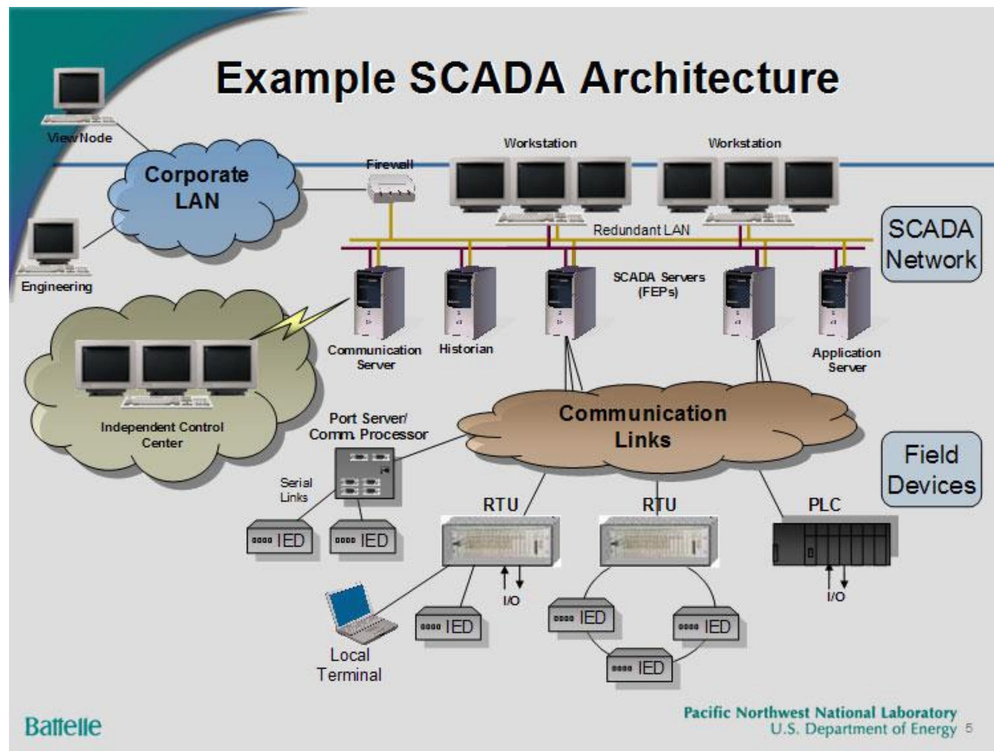


Figure 22-8 SCADA System

وغالبا ما تتكون أنظمة الـ SCADA من الأنظمة الفرعية التالية:

1- واجهة استخدام للمستخدم (Human–machine interface or HMI) وهي الشاشة النهائية التى تظهر عليها بيانات مُعالجة لمدير العمليات ، ومن خلال هذه البيانات المعالجة يقوم مدير العمليات بالمراقبة والتحكم في العمليات.

2- نظام المراقبة العمومي: عن طريق الحاسوب، الذى يقوم بتجميع البيانات عن الشبكة ويقوم بإرسال أوامر للتحكم فيها إيضا.

3- قناة الاتصال communication وهو يربط وحدات التحكم الطرفية بنظام المراقبة العمومي.

4- وحدات التحكم الطرفية (Remote terminal Unit RTU) ، وهي أداة تحكم ومراقبة عن بعد تقوم بجمع المعلومات من جميع الوحدات في المناطق الخارجية من إنذارات وقياسات والتى تكون مربوطة بالحساسات المستخدمة مثلا لقياس درجة الحرارة، أو مستوى سائل، أو ضغط مثلا.

وتقوم وحدات التحكم الطرفية بتحويل البيانات الخارجة من الحساسات إلى بيانات رقمية، وإرسالها إلى نظام المراقبة العمومى ، بمعنى أنها تقوم بتحويل الإشارات المتبادلة مع مركز توزيع الأحمال Load Dispatch Center, LDC إلى لغة تفهمها مكونات الشبكة الكهربية ، كذلك تقوم هذه الوحدة بجمع المعلومات من (إنذارات وأوضاع وقياسات وغيرها) من المحطات ونقلها إلى الـ Load Dispatch Center على شكل رقمي ، ثم في المركز يتم استقبالها وتحليلها واتخاذ الإجراء المناسب لكلٍ على حدة

.

ووحدة التحكم عند بعد (RTU) كجهاز تتكون من: Electronics Unit ، ومصدر للطاقة Power Supply ، ووحدة I/O Peripherals . والشكل 22-9 تظهر فى صورة الـ RTU الموجودة بلوحة أحد محولات التوزيع.

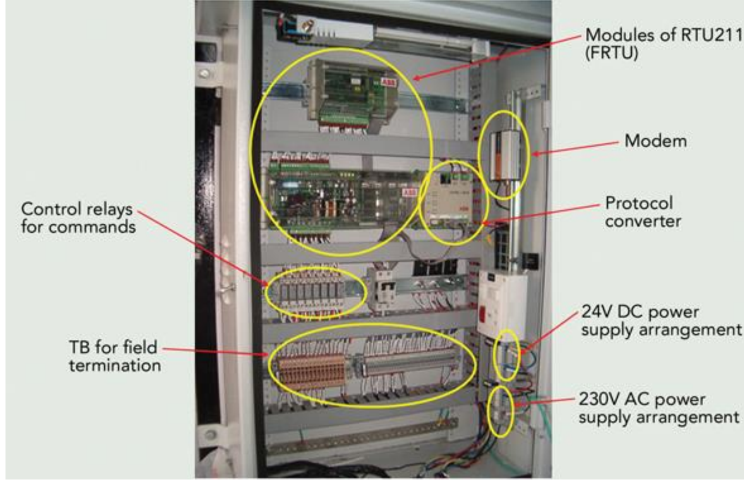


Figure 22-9 Transformer control

و تحتوي الـ (RTU) على جهاز GPS وذلك لتحديث الوقت والتاريخ في الجهاز بصورة مستمرة ، لأن الوقت والتاريخ أساسيين في عمل وحدة التحكم عن بعد ، فإرسال أي معلومة من قبل الوحدة لابد وأن تكون مرفقة بالوقت والتاريخ ومكان حدوثها وذلك لعمل التحليل المناسب لها في المركز بالسرعة والدقة المطلوبة واتخاذ الإجراء الصحيح حِيالها.

وتنقسم البيانات و المعلومات التي يتعامل معها(RTU) إلي :

1- الإنذارات (Alarms)
2- الأوضاع (Status)
3- القراءات و القياسات (Measurements):
4- الأوامر (Commands) :

وهي الأوامر التي تصدر من مركز توزيع الأحمال إلى المحطات من فتح وقفل وغيرها ، والتى يتم من خلالها التحكم عن بعد فى المهمات فيمكن للمهندس فى مركز التحكم فصل وتوصيل المهمات .
وفيما يلي تفاصيل أكثر عن الإشارات التى يتم تجميعها بواسطة الـ RTU والتى يتم نقلها بواسطة منظومة الاتصالات المناسبة إلى مركز التحكم .

ملحوظة:
من هذه المقدمة يمكن التفرقة بين Distribution Control System, DCS وبين الـ SCADA ، فالـ SCADA تعتبر أحد مكونات نظام الـ DCS الذى يمكنه التحكم فى شبكة مدينة كاملة ، بينما الـ SCADA تظهر عليها البيانات الخاصة بهذه الشبكة أو جزء منها لتساعد فى التحكم.

22.3.4 الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع

- بيان فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط
- بيان فصل و توصيل حالة سكينة الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح (داخل أو خارج الخلية) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية الاتجاهى لمغذيات الدخول
- بيان بإشارة فقد الجهد المستمر (D.C) لجميع المغذيات
- بيان بقيمة تيار الحمل لجميع المغذيات
- بيان بقيمة جهد (11 ك.ف) على الباسبار
- بيان بالإنذارات الاتية :-

– عطل بشاحن الـ RTU – عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
– عطل بشاحن اللوحة الرئيسية – عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
– بيان بفقد جهد الـ 220 فولت – بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
– بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU – بيان بحدوث حريق باللوحة
– بيان بحالة مفتاح الـ RTU (Local / Remot)
– بيان بحالة فتح و غلق باب اللوحة الرئيسى

22.3.5 إشارات منقولة من محطات المحولات

- بيان فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط
- بيان فصل و توصيل حالة سكينة الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح (داخل أو خارج الخلية) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج .
- بيان بإشارة فصل جهاز طرح الحمل لمغذيات الخروج
- بيان بإشارة فصل غياب الجهد المستمر (D.C) لجميع المغذيات
- بيان قيمة تيار الحمل لجميع المغذيات

- بيان بقيمة جهد (11 ك.ف) على الباسبار
-

بيان بالإنذارات الآتية:-

- – عطل بشاحن الـ RTU – عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
- – عطل بشاحن اللوحة الرئيسية – عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
- – فقد جهد الـ 220 فولت – بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
- – بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU
- – بيان بحالة مفتاح الـ RTU (Local / Remote) .

22.3.6 إشارات منقولة من محولات التوزيع

- بيان فصل و توصيل سكاكين الجهد المتوسط لمغذيات الدخول و الخروج و المحول .
- بيان حالة جهاز مبين الاعطال .
- بيان بفقد جهد الـ 220 لـ RTU.
- بيان بفقد جهد التيار المستمر .
- بيان بفقد الاتصال من الكشك إلى اللوحة .
- بيان بقيم تيارات الحمل على الجهد المنخفض .
- بيان بقيمة جهد اللوحة على الجهد المنخفض .

22.3.7 أدوار التحكم فى شبكات الجهد المتوسط:

يمكن الاستفادة من الإشارات المنقولة من محطات المحولات والموزعات ولوحات التوزيع والتى ذكرناها فى الجزء السابق فى عمل مهام رائعة فى التحكم فى شبكات التوزيع.

وفيما يلى بعضا من المهام (المكاسب) الرئيسية بعد إنشاء مراكز التحكم في شبكات الجهد المتوسط.

1- مراقبة الجهد لحظة بلحظة وتحديد اى تغيير فى حالة الشبكة فور حدوثه وهذا سوف يؤدى إلى سرعة التدخل لإصلاح الوضع واعادته إلى الوضع الطبيعى وتقليل فترات الفصل
2- المراقبة المستمرة لأحمال المغذيات والتأكد دائما أنها لم تتعدى الحدود المقننة لها وهذا سوف يؤدى إلى عدم تحميل مكونات الشبكة بأكثر من قدرتها مما يؤدى إلى الحفاظ على سلامتها وزيادة عمرها التشغيلى
3- نقل إشارات الأعطال وتحديد مكان العطل وذلك سيؤدى إلى تقليل زمن الفصل وعزل العطل
4- التحكم فى فصل وتوصيل المغذيات بالموزعات وعمل المناورات
5- تقدير فصل الحمل :وهى تسمى أيضا بادارة أحمال العميل وتشمل التحكم المباشر فى مناطق أحمال العميل الفردية بواسطة موقع مركزي عن بعد (remote central location)

6- سقوط الحمل Load Schedding :تسمح بالإسقاط السريع للأحمال الكبيرة تحت ظروف معينة وفقا لأساس الأولوية
7- تنظيم الجهد Voltage Regulation :تسمح بالتحكم عن بعد فى منظمات الجهد المحددة ضمن شبكة التوزيع . مع ملحوظة أن محولات التوزيع التى تحتوى على off load tap changer لا يمكن التحكم فى جهدها عن بعد.
8- Capacitor control ، تسمح بالتحكم عن بعد بفصل مكثفات التوزيع .
9- عمل دراسات الأحمال وتشمل جمع وتسجيل بيانات الأحمال ، وهذه البيانات تخزن فى نقطة تجميع بمحطة فرعية أو ترسل إلى مركز الارسال وبذلك تقدم معلومات دقيقة و وقتية للتخطيط و الهندسة فى نظم القوى الكهربية
10- اكتشاف العطل والموقع والعزل :أجهزة الاستشعار الموجودة فى شبكات التوزيع يمكن استخدامها فى الكشف والابلاغ عن اى ظروف غير طبيعية وهذه المعلومات يمكن استخدامها فى تحديد أماكن الأعطال تلقائيا وعزل مكان العطل وإعادة تشكيل الدائرة الكهربية وبذلك تساعد فريق إصلاح الأعطال فى الوصول إلى مكان العطل سريعا وكذلك تقصير مده فصل التيار عن العميل
11- متابعة دوائر التيار المستمر المسؤولة عن تغذية دوائر الكنترول وأجهزة الوقاية واكتشاف العطل بها بسرعة.
12- عند تزويد الأكشاك الكهربية بمفاتيح مميكنة يتم اكتشاف مكان العطل وعزله أتوماتيكيا وإعادة التغذية من الجهة الأخرى .
13- سهولة عمل دراسات للوقوف على حالة الشبكة في الأوضاع العادية والغير عادية والأوضاع الحرجة لمعاونة مهندسي التشغيل على اتخاذ القرارات السليمة لتحسين ورفع أداء الشبكة واستقرارها مثل:
   - تحديد المكان الأمثل لفتح حلقات التغذية بهدف تحسين الجهد وتقليل الفقد .
   - دراسة مستوى القصر .
   - دراسة تخطيط الشبكات.
   - التنبؤ بأحمال المغذيات.
   - حسابات الفقد في الطاقة.
14- التكامل مع العديد من برامج الحاسبات الآلية مثل نظام المعلومات الجغرافي الذي يتيح الحصول على صورة فورية لحالة أي مغذي، وبيان حالة الأجزاء المفصولة، والأجزاء التي تحت الجهد، موقعة على خريطة جغرافية حتى يمكن توجيه فرق إصلاح الأعطال لموقع العطل مباشرة.

ويراعى عند تصميم النظام تبني نظام الازدواجية Redundant System بحيث يكون لكل جهاز رئيسي بالمركز جهاز آخر احتياطي يقوم بالعمل آليا وبنفس الكفاءة في حالة حدوث أي خلل بالجهاز الرئيسي ، كما أن جميع أجهزة الحاسبات والطابعات متصلة ببعضها البعض عن طريق شبكة حاسبات مزدوجة LAN مما يوفر أعلى مستوى من الاعتمادية Reliability.

22.3.8 ثانيا التحكم فى شبكة الجهد المنخفض:

وتتم هذه العملية عن طريق العداد الذكى Smart Meter المركب عند المشترك سواء كان سكنى أو صناعى : وهو عداد مزود بمجموعة من الريليهات الموزعة على الأحمال المختلفة فى المنزل مثلا ويتم التحكم فى كل ريلاى على حدة لتقليل الحمل عند المشترك فى حالة وجود عجز فى التوليد وتستخدم فى :

1- التوصيل والفصل :تسمح بالتحكم عن بعد فى توصيل أو فصل الخدمة الكهربية عن العميل من موقع التحكم المركزى
2- تسعير أحمال الذروة : فهى تسمح بتنفيذ برامج تسعير أحمال الذروة باستخدام التحول عن بعد فى عداد السجلات Remote switching of meter register automatically
3- قراءة سجلات عداد العميل تلقائيا :تسمح بالتحكم عن بعد فى قراءة عدادات العملاء من حيث الاستهلاك الكلى و ذروة الطلب و وقتها فى اليوم و تحفظ القراءات الضرورية فى العدادات

ومن ثم يتم مقارنة القياسات المقاسة من الموزعات والقياسات المقاسة من عدادات المشتركين ومقارنتهم ببعض لمعرفة وجود أو عدم وجود سرقات كهربائية.

22.4 منظومة الاتصالات فى شبكات التوزيع : COMMUNICATIONS

تعتبر الاتصالات وسيط لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، لذلك نلاحظ أن أجهزة الاتصالات جزء منها يوضع في المحطات والجزء الآخر يوضع في مركز توزيع الأحمال . والشكل 22–10 يلخص هذه المنظومة.

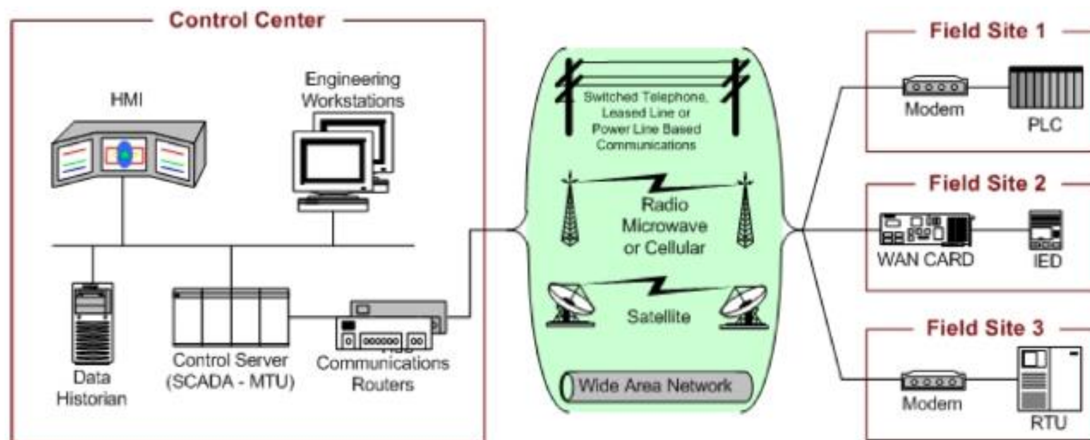


Figure 22-10

وقد سبق الحديث فى الفصل الأخير من الباب الثالث عن وسائط نقل المعلومات فيمكن الرجوع إليها.

22.4.1 شبكة الاتصالات فى الجهد المتوسط

ويتم عبرها نقل البيانات من المواقع المختلفة إلى مركز التحكم وفي العادة يفضل أن تكون هذه الوسائل خاصة بشركات الكهرباء و عدم الاعتماد على شبكات أخرى ملك الغير ما أمكن. والوسائل المستخدمة هي:

أولا: بين الأكشاك و لوحات التوزيع:

يتم نقل البيانات والإشارات عن طريق الـ DLC (Distribution Line Carrier) من خلال كابلات الجهد المتوسط وذلك

- إما باستخدام أرضى الكابلات (Shield)
- أو باستخدام احد أوجه الكابلات(Phase)

ثانيا: بين محطات المحولات و لوحات التوزيع ومركز التحكم:

يتم نقل البيانات والإشارات من محطات المحولات و لوحات التوزيع إلى مركز التحكم عن طريق شبكة اللاسلكي(Radio Frequency) على الحيز الترددي العاليVHF .

22.5 ملحق بأشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات

ETAP

ETAP is a company specialising in electrical power system modeling, design, analysis, optimization, and predictive real-time solutions.

Functions include arc flash analysis, load flow analysis, short circuit analysis, motor starting, OPF, transient stability analysis, generator start-up, parameter estimation, cable sizing, transformer tap optimization, reliability assessment, transmission line constant calculations, harmonic analysis, protection coordination, dc load flow, battery discharge and sizing, earth grid design, cable pulling, and GIS map integration.

PowerWorld

PowerWorld Corporation are a Champaign, Illinois based firm that develop the PowerWorld Simulator suite of power systems analysis tools for Windows. The software focuses on a visual approach to power system simulation.

Functions include load flow, short circuit, contingency analysis, sensitivity calculations, security constrained OPF, transient stability, transmission line parameter calculations. Includes scripting support.

MathWorks (SimPowerSystems)

Mathworks, the makers of general purpose mathematical software MATLAB, also develop an power systems simulation program. SimPowerSystems is a tool that extends MATLAB's Simulink and provides models of many components used in power systems, including three-phase machines, electric drives, and libraries of application-specific models such as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and wind-power generation. Harmonic analysis, calculation of Total Harmonic Distortion (THD), load flow, and other key power system analyses are automated.

EasyPower

The flagship product, EasyPower, includes the following modules: arc flash analysis, power flow, short circuit, OPF, protective device

coordination, dynamic stability, transient motor starting, and harmonic analysis.

Additional workflow enhancing modules include SmartPDC™, which automates protective device coordination, and SmartDesign™ which automatically sizes feeders, breakers, switchgear, fuses, busway, MCCs, panels, etc to NEC requirements. The ScenarioManager feature allows the study of multiple system scenarios on the fly.

Oneline Designer is a cost effective solution for people who are dedicated to creating onelines, as well as system data collection and entry.

EMTP-RV

The ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) was first developed by Prof. Hermann Dommel in the 60s/70s for the analysis of electromagnetic transients. It was commercialised in 1987 and released as DCG EMTP and later EMTP96. EMTP-RV is the latest commercial released of the program, created by Jean Mahseredjian and currently being developed byPOWERSYS.

ATP-EMTP

The Alternative Transients Program (ATP) is a free (closed source) program for the digital simulation of electromagnetic (and electromechanical) transient phenomena. ATP-EMTP was first developed in 1984.

ASPEN

ASPEN (Advanced Systems for Power Engineering) are a California based company that develops the following separate Windows platform products:

- OneLiner - short circuit and relay coordination program (and the Breaker Rating Module add-on checks the rating of circuit breakers against the short circuit currents they need to interrupt)
- DistriView - integrated suite of voltage drop, short circuit, relay coordination, and harmonics and reliability calculation software for utility distribution systems
- Power Flow Program - power flow program designed for the planning, design and operating studies of transmission,

sub-transmission and distribution networks (includes a BASIC-style scripting language)

- Line Constants Program - calculates electrical parameters of overhead transmission lines and underground cables
- Relay Database - a repository of relay information for electric utilities and industrial facilities
- Line Database - an electronic depository of data related to power lines and cables

الباب الخامس

كابلات القوى الكهربية

مقدمة عامة للباب

الكابلات الكهربية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل الطاقة الكهربية وتوزيعها في المدن والمناطق المزدحمة بالسكان ، حيث يصعب مد الخطوط الهوائية. وتتميز الكابلات بسهولة و سرعة إنشاء خطوطها مقارنة بالخطوط الهوائية. كما أنها تشغل حيز أقل من الأرض ولها عمر افتراضي أطول ، بالإضافة إلى سهولة تغيير مسار الكابل عند الدفن إلى زاوية معينة حسب سمك الكابل.

لكن من عيوب الكابلات صعوبة تحديد العطل مباشرة و صعوبة الوصول إليها في حالة الصيانة ، كما أنها تحتاج لشدة عزل عالية ، وبالتالي فهى أعلى فى التكلفة من الخطوط الهوائية. كما أن استخدام الخطوط الهوائية أكثر اقتصادية من الكابلات ، حيث تصل تكلفة خطوط الكابلات من 10 إلى 20 مرة تكلفة الخطوط الهوائية ، والسبب فى ذلك أن موصلات الخطوط الهوائية مكشوفة بدون عازل ، أما الكابلات فهي مغطاة بأكملها بمادة عازلة . إلا أن هذا الرقم قل كثيرا بعد الكثير من البحوث والتطوير. وهناك مقارنة تفصيلية أكبر بين النظامين فى مقدمة الباب الثانى من هذا الكتاب.

الكابل عموما يتكون من جزئين : الموصل و العازل ، ولا تختلف مساحة الموصل الحاملة لنفس التيار سواء كانت الكابلات جهد منخفض أو متوسط أو عالي حيث أن مساحة الموصل تعتمد فقط على مقدار التيار الكهربي الذي يتم نقله أما سمك العازل فيعتمد على فرق الجهد الكهربي على الكابل و هنا يظهر الفرق في أحجام الكابلات حيث كلما زاد الجهد زادت مساحة العزل ، فإن زاد الجهد على الكابل فإن العزل ينكسر بمعنى أنه يفقد قدرته على عزل الكهرباء و بالتالي يكون هناك خطر على جميع الأجهزة و على البشر قبل كل شئ .

تصنيف الكابلات

تصنف الكابلات تبعاً للجهد : جهد منخفض (حتى 1 ك ف) وجهد متوسط (من 1 حتى 33 ك ف) وجهد عالي (بدءا من 66 ك ف) . وهناك فرق كبير بين كابلات الجهد المنخفض والكابلات الأخرى فى عدد الطبقات بالكابل ونوعية العزل ، لكن ليس هناك فرق كبير بين كابلات الجهد المتوسط والعالي ، والفرق بينهما ليس فى عدد الطبقات وإنما فى خواص المواد المستخدمة فى كل جهد منهما (المتوسط والعالي).

وتصنف الكابلات أيضا تبعا لنوع العزل فهى أما PVC أو XLPE أو هما معاً ، وقد يستخدم ورق مشبع بالزيت . علما بأن الورق المشبع بالزيت أعلى شدة فى العزل الكهربى و أطول فى عمره الافتراضي بالمقارنة بجميع العوازل الأخرى المستعملة ، لكن يعيبه أن ليس له مقاومة للرطوبة وأنه غير مرن .



وتصنف الكابلات أيضا حسب عدد القلوب ، فالكابلات إما أن تكون مفردة القلب Single Core أو متعددة القلب Multi–Core لأربعة قلوب مثلا كما فى الصورة ، وقلب الكابل عبارة عن موصل يحيط به مادة عازلة تعزله عن باقي القلوب وكذلك مكونات الكابل .



وفى حالة الكابل Multicore يكون قطره الخارجى كبير جدًا فى المقاطع الكبيرة وبالتالي يصعب نقله والتعامل معه ، لذلك يتم فى هذه الحالة استخدام كابلات Single Core. وأهم عيوب هذا النوع (أحادي القلب) تتمثل في أن التسليح بالصلب يتسبب فى حدوث فقد فى الطاقة Loss في طبقة التغليف بسبب الـ Induced currents بما يساوي أو يزيد عن الفقد في موصل الكابل نفسه Cupper Losses لذلك يتم تسليحه بمادة غير موصلة .

ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات Multicore يؤدي إلى خفض التكاليف ، أما الكابلات الـ Single Core فهى أكثر مرونة وأسهل في التركيب والتوصيل.

موضوعات الباب

مهندس القوى الكهربية لابد يوما من أن يتعامل مع الكابلات ، سواء كابلات الجهد المنخفض (راجع كتابى المرجع فى التركيبات الكهربية) أو كابلات الجهد المتوسط والعالي والتى تدرس فى هذا الكتاب.
وأهم المواضيع التى سنتعرض لها هنا فى هذا الكتاب حسب فصول الباب هى :

1. الفصل الأول :
   a. المواد المعدنية المستخدمة في صناعة الكابلات
   b. المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات
2. الفصل الثانى : تركيب كابلات الجهد العالي
3. الفصل الثالث : الخواص الكهربية للكابلات
4. الفصل الرابع : اختبارات الكابلات
5. الفصل الخامس : اكتشاف أعطال الكابلات



23

المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

23.1 المواد المعدنية المستخدمة فى صناعة الموصلات

أشهر الموصلات المستخدمة فى الكابلات هى النحاس والألومنيوم. ويعتبر النحاس أكثر الأنواع شهرة في الاستخدام كموصل كهربائي لعدة أسباب منها: أنه الأفضل توصيلا للكهرباء (مقاومة أقل) . وهو معدن له قوة إحتمال كبيرة للإجهادات الميكانيكية و يمكن تشكيله. لكن عيب النحاس الرئيسى هو ارتفاع ثمنه.

أما الألومنيوم فيتميز برخص ثمنه وخفة وزنه وسهولة السحب والتشكيل على الحار والبارد. ويمكن اعتبار أن تحمل كابل ذى موصل ألمونيوم لشدة التيار يساوى 70% إلى 80% من مثيله النحاسي ، مع ملاحظة أن الانخفاض فى السعر أكبر من هذه النسبة ، وهذا ما يجعل الألومنيوم أكثر إغراء فى الاستخدام. ويشترط تبعا لمعظم المواصفات ألا تقل نسبة نقاوة الألومنيوم المستخدم عن 99% . والجدول 23-1 يعطى بعض أوجه المقارنات بين الاثنين.

Table 23-1 مقارنة بين الألومنيوم والنحاس

CHARACTERISTICS	COPPER	ALUMINUM
Tensile strength for same conductivity	55000	40000
Weight for same conductivity (lb).	100	48
Cross section for same conductivity	100	160
Specific resistance	10	17
Cost	Relatively high	Relatively low

وأهم العيوب الأساسية فى موصلات الألومنيوم هو تكون طبقة رقيقة وصلبة من أكسيد الألومنيوم الردئ التوصيل للكهرباء على سطح الموصل ، وهذا يسبب مشكلة فى نقاط التوصيل لذا يلزم التأكد عند عمل

توصيلات مع كابلات الألومنيوم أن يكون مكان التوصيل لامعا وغير مؤكسد ، ويفضل وضع مانع التأكسد على الموصل .

وحاولت بعض الشركات الجمع بين ميزات الاثنين فأنتجت موصلات عبارة عن قلب من الألومنيوم محاط بطبقة سميكة من النحاس الملتصق بالألومنيوم وسمكها من 10 % إلى 27 % من الوزن الكلى للكابل . وتسمى موصلات الألومنيوم الملبسة بالنحاس. Copper–Clad–Aluminum Conductors, ACAC

وأحد أهداف التلبيس النحاسي Copper Clad هو التغلب على المشاكل الناجمة عند وصلات مع الألومنيوم ، فمعلوم أنه لا يصح ربط موصل ألومنيوم مباشرة على BB نحاس بسبب اختلاف الجهد الجلفانى بينهما ، ومن ثم يحدث تآكل للموصل الأسبق فى الترتيب خلال الزمن وهو فى هذه الحالة النحاس أى أن قضبان التوزيع ستتآكل مع الوقت .

وهناك حل آخر لهذه المشكلة وهو استخدام Pi–metal glands وهى تستخدم فقط عند ربط كابلات الألومنيوم مع قضبان النحاس كما فى الشكل 23–1.



Figure 23-1 Pi metal glands

23.1.1 ثانيا المواد المعدنية المستخدمة للحماية

وهناك عنصر معدنى آخر مرتبط بالكابلات وهو المعدن المحيط خارجيا بالكابل من أجل توفير حماية ميكانيكية له مثل الرصاص والحديد المجلفن والألومنيوم.

ويستخدم الحديد المجلفن لأن عملية الجلفنة تعطي الكابل قدرة عالية ضد التأكل ، ولذلك أصبح الحارس الخارجي الأول للكابل إما أشرطة الحديد المجلفن أو أسلاك الحديد المجلفن كما سيأتى بالتفصيل فى الجزء الخاص بتركيب الكابل.

23.2 المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات

المواد العازلة أنواع : فمنها ما هو عنصر مثل الغازات الخاملة ، ومنها ما هو مركبات سواء كانت مركبات عضوية أو غير عضوية. و أغلب المواد المستخدمة فى الواقع وهى مركبات ، لاسيما المركبات العضوية مثل الـ PVC .

23.2.1 ما معنى عازل كهربائي؟

كلمة "عازل كهربي" تترجم إما إلى : dielectric ، وفى هذه الحالة نقصد به المادة التى يمر فيها المجال الكهربي. مثل المادة العازلة بين الأقطاب المعدنية في المكثف مثلا. وقد تترجم إلى "insulator" ، وفى هذه الحالة نقصد به المادة التى تستخدم لمنع مرور التيار الكهربي عبره.

وبسبب المسافات الكبيرة بين الذرات وبعضها في المادة العازلة والارتباط الشديد بين الإلكترونات والنواة فإنه يصعب انتقال الإلكترونات من ذرة إلى أخرى عند وجود تأثير مجال كهربي خارجي عليها. وهذا هو العازل الكهربي.

وبسبب المجال يمكن تمثيل الذرة بقطبين كهربائيين أحدهما سالب والآخر موجب الشحنة. وتتصف المواد العازلة بأن كل ذرة فيه تتخذ شكل القطبين تحت تأثير مجال كهربائي خارجي ، ولا تتنقل الإلكترونات بين الذرات، أي لا تسمح بمرور تيار كهربائي.

وأهم ما يميز هذه المواد كونها غير موصلة ، فالإلكترونات فيها غير حرة الحركة كما هي في المعادن الموصلة ، وإنما تميل إلى وضع الاستقطاب Polarization في حال توجيه مجال كهربائي عليها ، بمعنى أن تتجه الإلكترونات إلى طرف من العازل (لتنشأ قطبا سالبا) بينما تزيد الشحنة الكهربية الموجبة في الطرف العكسي (فتنشأ قطبا موجبا) – وهذا هو معنى استقطاب المادة Polarization .

23.2.2 أهم خصائص المادة العازلة كهربيا

أهم الخصائص التى يجب أن تتميز بها المادة لتوصف بأنها عازلة كهربيا هى:

1- أن تكون لها مقاومة نوعية عالية .
2- أن يكون لها جهد انكسار عالي .
3- ألا تقبل امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط بها .
4- لا تتفاعل مع الأحماض والقلويات الموجودة بالتربة .
5- أن تكون لها خاصية الصلابة و المرونة معاً .
6- لا تتأثر أو تتغير مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن تيار الحمل العادي أو أقصى حمل أو الحرارة الناتجة عن تيار القصر .

7- لا تقبل سريان الحريق .

8- أقل فقد كهربائى ممكن أثناء التشغيل .

23.3 مقدمة عن البوليمرات

معظم العوازل الكهربية الآن مصنوعة من البوليمرات ، فما هى البوليمرات؟

أن كلمة (بوليمر) لاتينية الأصل ، وهي مركبة من مقطعين هما : بولي poly وتعني متعدد ، و مر mer وتعني جزء أو وحدة ، لذلك polymer تعني متعدد الأجزاء أو متعدد الوحدات . ويسمى في بعض الأحيان الجزيء العملاق (macromolecule) وهو جزيء لمركب كيميائي ويتمثل بوزن جزيئي عالي (10000 إلى 10مليون) . والجزيء على شكل سلسلة حلقاتها عبارة عن جزيئات لمركب بسيط ، ترتبط مع بعضها البعض بروابط تساهمية (covalent bond) .

و البوليمر هو مركب ذو وزن جزيئي مرتفع مكون من وحدات جزيئية مكررة. قد تكون هذه المواد عضوية أو غير عضوية أو عضوية معدنية، وقد تكون طبيعية أو صناعية في أصلها . وقد عرف الإنسان البوليمرات منذ القدم واستخدم المنتجات النباتية و الحيوانية البوليمرية الطبيعية لأغراض مختلفة في حياته اليومية ، فقد استخدم الإنسان القار "pitch" و الراتنجات "resin" النباتية كما عرف الصمغ "gum " و المطاط "rubber" قبل آلاف السنين.

و تضم البوليمرات الطبيعية أيضا العضوية النشا، والسيليلوز، والأحماض الأمينية، والبروتينات. والآن تعد البوليمرات العضوية ذات أهمية بالغة في حياة الإنسان إذ تدخل في الوقت الحاضر في مكونات غذائه وكسائه ومسكنه ، فهو ينتفع من النشويات والسكريات والبروتينات في الغذاء ، ويستخدم القطن والصوف والحرير وجلود الحيوانات في صنع الملابس كما يستفيد من الخشب في تشييد المسكن والأثاث ويستخدم المطاط والصمغ وغيرها من المواد البوليمرية الطبيعية التي لا تحصى في أغراض شتى.

وبالرغم من أن معظم البوليمرات الطبيعية تعتبر عضوية (أى أنها مبنية على سلسلة كربونية) ، فإنه يوجد أيضا بوليمرات غير عضوية ، وغالبا تكون سلاسلها مبنية على أصل من السيليكون.

وتشمل البوليمرات الطبيعية غير العضوية الألماس، والجرافيت، والرمل، والاسبستوس، والعقيق، والميكا.

23.3.1 تطبيقات البوليمرات الصناعية Synthetic Polymer

في القرن العشرين عندما زادت الحاجة للمطاط في الحرب العالمية الثانية استطاع العلماء الألمان إنتاج المطاط الصناعي وهو يعطى نفس مواصفات المطاط الطبيعي وتقريبا نفس التركيب الكيميائى . وتعتبر البولمرات الصناعية بولمرات بسيطة نسبيا بالمقارنة مع البولمرات الطبيعية وأقل في التكلفة.

البوليمرات الصناعية مثل المواد التي غزت الأسواق العالمية حديثا ، ومنها المواد البلاستيكية Plastics ، والمطاط Rubber ، والجلود الصناعية Leather Synthetic ، وأقمشة النايلون Nylons ، والبولي استر Polyesters. ومنها الثرمو بلاستيكات وهي المبلمرات الصناعية الصلبة التي تلين بارتفاع الحرارة ثم تعود لصلابتها بالتبريد دون تغير في تركيبها الكيميائي ، وغيرها . ومنها أيضا الألياف الصناعية Fibers : وهي من أهم البولمرات المستخدمة في الصناعة وتمتاز بمقاومة شديدة للتشوه وتتحمل إطالة صغيرة حوالى (10-50%) ولها قوة شد عالية و تمتاز بضعف امتصاصها للرطوبة .

وفي الآونة الأخيرة أخذت صناعة البوليمرات تدخل حتى في عالم الإلكترونيات و بشكل كبير حتى دخلت في تصنيع مصادر الطاقة للأجهزة الإلكترونية المحمولة نظرا لخفة وزنها ولمواصفاتها الأخرى الحسنة . وقد حلت بعض البوليمرات المحضرة صناعيا في الآونة الأخيرة مكان المواد الطبيعية فأصبحنا نستخدم مواسير الـ PVC بدلا من مواسير الحديد مثلا وهذا ناتج عن التطور الهائل الذي حصل في الصناعات الكيماوية والقائمة على النفط ومشتقاته . وهذه تتميز بصفات ميكانيكية جيدة كما تتميز برخص الثمن وتوفرها بشكل كبير وقد تم استخدامها في صناعة الأدوات المنزلية والصناعات الحربية و المدنية كالسيارات والطائرات والغواصات والأجهزة الكهربية.

وبالإضافة إلى المجالات السابقة تمكن العلماء من وضع آلية تمكن من الاستفادة من البوليمرات في مجال التوصيل الكهربي وعلى وجه الخصوص في مجال تصنيع البطاريات الكهربية والعوازل الكهربية ، وهو ما يهمنا هنا.

و تنقسم لدائن البوليمر البلاستيكية إلى نوعين أساسين هما:

1- اللدائن الحرارية:-thermo-plastices
2- الجوامد الحرارية :-thermo-sets

23.3.2 اللدائن الحرارية : البولى فينيل كلورايد PVC

اللدائن الحرارية هي أنواع من اللدائن تلين بالحرارة وتتصلد بالبرودة . ويعتبر الـ PVC من أشهر اللدائن الحرارية المستخدمة فى صناعة الكابلات .

ويتميز الـ PVC بخواص كهربية ممتازة عند الجهود المنخفضة (لا يستخدم فى غيرها) وعند درجات الحرارة المنخفضة ، إلى جانب رخص ثمنه. ومن ثم فهو دائما الاختيار الأول فى جميع أنحاء العالم فى الجهود المنخفضة. لكن عازليته تتأثر بدرجة الحرارة ومن ثم لايصلح فى التطبيقات ذات الحرارة العالية ، فعند ارتفاع درجات الحرارة تكون مادة (P.V.C) أكثر ليونة وهذا بالطبع غير مرغوب فيه . كما أن مقاومته تكون ضعيفة فى درجات الحرارة المنخفضة جدا حيث يمكن أن يحدث به تشققات .

و يتميز الـ PVC بخاصية الإطفاء الذاتى للهب فهو يشتعل عند تقريب لهب إليه لكنه ينطفئ بمجرد إبعاد اللهب ، إلا أنه ينتج غازات سامة عند اشتعاله. وأخيراً يجب أن يراعى ألا يتعرض الـ PVC إلى الإنحناءات الحادة فهو ليس مثل المطاط فى هذه الخاصية.

ويمكن إجمال سمات الـ PVC فيما يلى:

1- لها مقاومة نوعية عالية .
2- لها جهد انكسار منخفض فلا يستخدم إلا فى تطبيقات تصل حتى 1000 فولت فقط.
3- لها خاصية عدم امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط .
4- غير نشطة كيميائيا أى خاملة " لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات " .
5- تتأثر مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة .
6- لها خاصية الصلابة والمرونة .
7- لا تتأثر بالمذيبات أو الشحوم .
8- لا تتأثر بالمياه .

23.3.3 الجوامد الحرارية :-Thermo-sets

وهى اللدائن التي لاتلين بالحرارة حتى درجة تحللها ، ويمكن صناعيا " تحويل" العديد من اللدائن الحرارية إلى جوامد حرارية وذلك بإجراء معالجة خاصة عليها تسمي التشابكية cross-linking. ويوجد نوعان من الجوامد الحرارية يستخدمان في صناعة الكابلات:

23.3.4 المطاط:-RUBBER

يعتبر مطاط البنيل bntyl rubber من أشهر أنواع المطاط الصناعي ، وقد تم استخدامه على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظرا لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن كما استخدم أيضا في كابلات الجهد العالي بسبب مقاومته لغاز الأوزون الذي يتصاعد نتيجة لظاهرة الكرونا corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربي.

23.3.5 البولي ايثلين التشابكيXLPE :-

مادة XLPE هي أشهر الجوامد الحرارية على الإطلاق المستعملة الآن في صناعة الكابلات ، كما أن مادة PVC هي أشهر اللدائن الحرارية . يتم تركيب المادة على موصل للكابل عن طريق البثق EXTRUSION عندما يكون في الحالة اللدنة عند درجة حرارة مرتفعة ثم تتعرض المادة لعدة عمليات كيميائية ينتج عنها تغيير في التركيب الجزيئي لها مما ينتج عنة مادة مرنة قاسية لا تلين بعد ذلك بارتفاع درجة الحرارة. ويستعمل XLPE كعازل في الكابلات حتى حرارة مستمرة تصل إلى 90 درجة مئوية.

وهو أكثر المواد استخداما الآن فى كابلات الجهد العالى والمتوسط ، حيث أنه مادة لا تلين بالحرارة حتى درجة حرارة إحتراقها أو تحللها ويتميز بخواص كهربية وفيزيائية وكيميائية ممتازة ، ويمكن استخدامها في درجة حرارة مستمرة للموصل حتى 90 درجة مئوية وبدرجة حرارة 250 درجة مئوية في فترات قصر الدائرة وتعتبر مقاومته ممتازة للرطوبة ولغاز الأوزون الذي يتصاعد نتيجة لظاهرة الكرونا Corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربي للعازل وهو مادة صلدة جداً غير قابلة للاشتعال.

23.4أبرز مشاكل العوازل

تعانى العوازل المستخدمة فى الكابلات الكهربية من عدة مشاكل . منها:

23.4.1 المفقودات Losses

والـ Loss عموما تسبب ارتفاع فى درجة حرارة الكابل ، ومن ثم يجب التأكد دائما من وجود اتزان حراري للكابل ، بمعنى أن الحرارة المتولدة تساوى (أو أقل من) الحرارة المتسربة من الكابل . لاحظ أن الحرارة المتسربة من الكابل تتوقف فى حالة دفن الكابل تحت الأرض على المقاومة الحرارية لنوعية التربة ومسامية حبيباتها.

مفقودات القدرة خلال العازل المحيط بالموصل Insulation Loss تحسب من المعادلة التالية:

$$P_{ins} = V^2 \omega C \tan \delta$$

حيث (δ) هى زاوية الفقد Loss angle لمادة العازل المحيط بالكابل ، وهى الزاوية بين الجهد والتيار المتسرب ، وبالتالي تختلف عن زاوية الـ Power Factor التى تكون بين الجهد وتيار الـ Load . والزاوية (δ) إحدى الثوابت التى تميز مادة عازلة من أخرى ، ومن الواضح أنها كلما زادت قيمتها كلما زادت الـ Power loss خلال العازل.

23.4.2 التيارات المتسربة خلال العوازل

تعتبر ظاهرة تسرب التيار على مدى طول الكابل خلال طبقات العازل التى تحيط بموصل الكابل من المشاكل السلبية التى تظهر بوضوح فى الكابلات ، ويسمى هذا التيار بتيار الشحن Charging Current أو التيار المتسرب Leakage Current . وتحسب قيمة هذا التيار من المعادلة:

$$I_C = V\omega C$$

حيث

V هو جهد التشغيل مقاسا بالـ Volt.

ω ترتبط بتردد التيار (f) المار بالكابل من خلال العلاقة (ω= 2πf).

C هى السعة (Capacitance) مقاسة بالـ Farad .

ومن هنا ، فكلما زاد جهد التشغيل ، أو زادت الـ Capacitance الخاصة بالكابل كلما ارتفعت قيمة التيار المتسرب على طول الكابل ، حتى أنه يصل إلى 13A لكل كيلومتر طولى فى الكابلات جهد 220 kV.

و عندما يصل طول الكابل إلى قيمة معينة (تسمى الطول الحرج Critical Length) فإن قيمة تيار الشحن المتسرب من الكابل تصبح مساوية لقيمة التيار المقنن للكابل I_R . و هذا يعني أن كل الـ Power المنقولة خلال الكابل قد تسربت ، و لم يصل للحمل منها شئ.

والطول الحرج في منظومة الـ 132 kV هو 64 Km ، بينما يصل هذا الطول الحرج في منظومة الـ 400 KV إلى 24 Km فقط . ومن الواضح أنه كلما زاد الجهد زاد التيار المتسرب وبالتالي يقل الطول الحرج وهذا من عيوب الكابلات التى لا حل لها.

23.4.3 ظاهرة WATER TREE :

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدى إلى نشوء ظاهرة التشجير المائى (Water Treeing) – لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم – فعند تتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة بسبب عدم انتظام المجال الكهربي بين الموصل والمادة العازلة على طول الكابل بسبب وجود نتوءات كأحد صور عيوب التصنيع ، ينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربي عند نقط النتوءات وقلته عند الجزء الأملس من الكابل. و هذا

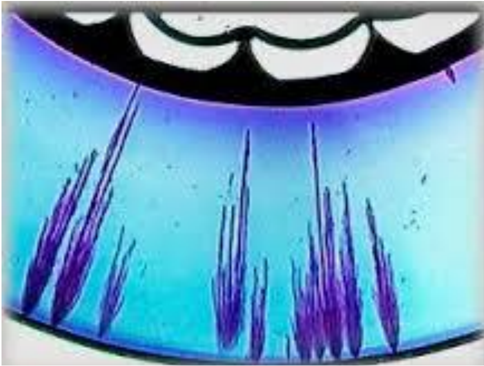


Figure 23-2 Water tree

الاختلاف يتسبب فى وجود شقوق فى العزل تتفرع فى جميع الاتجاهات مثل الشجر (شكل 23-2) . ويعتبر تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات إحد أهم أسباب انهيار العزل.

24

تركيب الكابل

تتشابه كل الكابلات في أنها تحتوي على موصلات لحمل التيار ، وعازل محيط بالموصلات ، ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكابل. وهذا هو المشترك بين كابلات الجهد المنخفض وكابلات الجهد المتوسط والعالي ، لكن كابلات الجهد المتوسط و العالي تزيد عن هذا التركيب البسيط بعدة طبقات أخرى لعلاج مشاكل الجهود العالية وعدم تماثل توزيع الجهد كما سنرى.

وسنركز هنا على تركيب كابلات الجهد العالي (سنستخدم هذا المصطلح للتعبير عن كابلات الجهد المتوسط والعالي لأن الفرق بينهما ليس فى عدد الطبقات وإنما فى خواص المواد المستخدمة فى كل طبقة) وخاصة كابلات XLPE وهى الأكثر انتشارا فى الشبكات الآن بعد ضآلة فرص استخدام الورق المشبع بالزيت والذى كان قديما هو الأكثر انتشارا.

24.1 تركيب كابلات الجهد العالي :

داخل كابلات الجهد العالي والمتوسط توجد عدة طبقات (شكل 24-1) ، كما يلى:

1. الموصل .
2. حجاب الموصل الأول (شبه الموصل) Semiconductor Layer.
3. العزل Insulation
4. حجاب العزل (شبه الموصل الثاني) Semiconductor Layer .
5. حجاب العزل الثانى (الشبكة النحاسية) أو Metallic Sheath
6. الحشــو (أو الفرشة). Filling
7. شنبر التسليح إن وجد Armoring.
8. عزل داخلى (بلاستيك)
9. الغلاف الخارجي . Outer Sheath

وسنعرض بالتفصيل لمواصفات كل طبقة واستخداماتها.

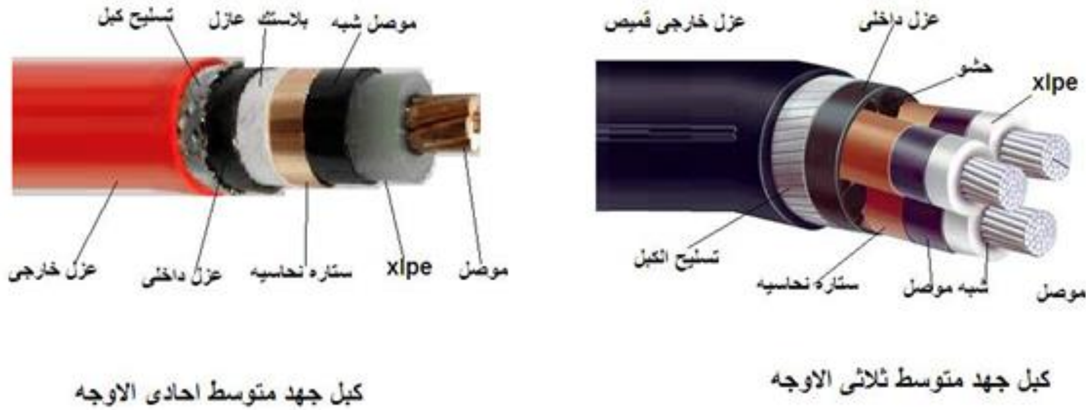


Figure 24-1 الطبقات المختلفة فى كابلات الجهد العالى

24.1.1 الموصل Conductor

يعتمد اختيار السلك الموصل على عدة سمات منها مقدار التيار الذي يمر فيه Ampacity ، والجهد والخواص الفيزيائية والمرونة Flexibility ، وبالطبع الناحية الاقتصادية.

والموصلات عادة تصنع من أسلاك مجدولة stranded كما سبق أن ذكرنا عند الحديث عن موصلات الخطوط الهوائية فى الباب الثانى (يفضل الرجوع إليها الآن لمراجعة سمات الأسلاك المجدولة).

ومقاس الموصل Size يقدر بمساحة مقطعه ، والذي يقدر عادة بالملم المربع بالمعايير الدولية أو يقاس بوحدة American Wire Gauge, AWG حسب المقاييس الأمريكية . والمساحة هي مجموع مساحة الشعيرات المستخدمة. والجدول التالى يعطى معلومات عن العلاقة بين نظامى القياس والذين يجب أن يحيط بهما أى مهندس .

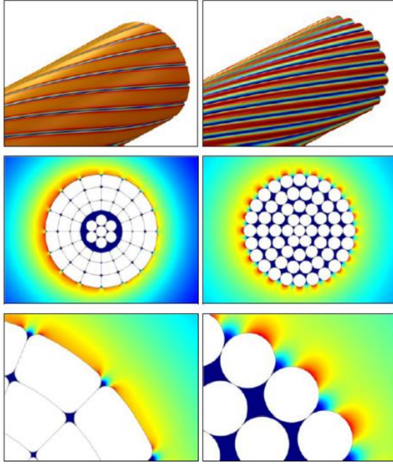
AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm^2]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

لاحظ فى النظام الأمريكى أنه كلما كبر الرقم كلما صغرت مساحة المقطع كما فى الشكل.



وقد سبق الحديث عن المواد المستخدمة فى صناعة الموصلات. تبقى فقط الحديث عن مقاومة الموصل وهذا موجود فى الفصل التالي عند الحديث عن المواصفات الكهربية للكابلات.

24.1.2 حجاب الموصل (طبقة شبه الموصل) Semiconductor Layer


Figure 24-2 تأثير عملية الجدل على توزيع شدة المجال

تتسبب عملية جدل الأسلاك للحصول على موصل الكابل في زيادة شدة المجال الكهربي على سطح الموصل بنسبة تصل إلى 20% ، فالجدل غير مستقيم يؤدي إلى عدم انتظام المجال الكهربي في السطح الداخلي بين العازل و الموصل و الذي ينتج عنه ارتفاع / انخفاض قيم المجال في بعض النقاط كما فى الشكل 24-2. و هذا الاختلاف قد يؤدي إلى انهيار العزل.

وهذه المشكلة قد تؤدي أيضا إلى حدوث ظاهرة الـ water tree وتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة لوجود هذه النتوءات التى تؤدى لوجود شقوق فى الكابل تتفرع فى جميع الاتجاهات مثل الشجر كما سبق الحديث عنه فى نهاية الفصل السابق.

ولعلاج هذه المشكلة فإننا نأخذ في الاعتبار في تصنيع الكابل تركيب مادة شبه موصلة (شكل 24-3) تسمى ستارة الموصل (Conductor Shield) و هي تستخدم لتقليل ظاهرة الـ stranded effect و من أجل الحصول على أفضل توزيع للمجال الكهربي حيث أن هذه الطبقة تعمل على تنعيم سطح الموصل و جعله أملس. كما تعمل على تنظيم خطوط المجال الكهربي لتصبح غير عمودية على سطح الموصل.

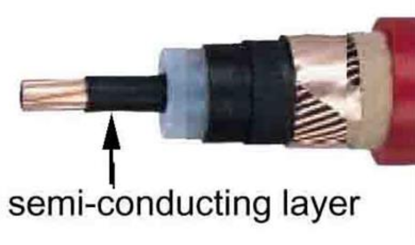


Figure 24-3

وتصنع هذه المادة من مادة البلاستيك مع إضافة كربون أسود لإعطاء الحجاب خاصية شبه التوصيل (بحيث تكون مقاومة شبه الموصل أعلى من مقاومة الموصل نفسه) ويساعد شبه الموصل هذا على انتظام المجال الكهربي داخل العازل كما ذكرنا.

كما أن الخاصية البلاستيكية للمادة شبه الموصلة تجعلها ملائمة للتمدد والانكماش مع العازل في فترات زيادة أو قلة الأحمال على الكابل (زيادة الحمل تزيد حرارة الكابل) مما يؤدي إلى منع تكون أي فقاعات داخل الكابل بين الموصل والعازل . علما بأن وجود تلك الفقاعات مع الإجهادات الكهربية يؤدي إلى تأين الهواء بالفقاعة وبالتالي انهيار العازل واحتراق الكابل .

24.1.3 العـــــزل INSULATION

ويعتبر العزل أهم مكونات الكابل فإذا ضعف العزل أو انهار أصبح الكابل بلا فائدة ولا قيمة له ومن أجل ذلك فإن أهم اختبار يجرى فى المصنع بعد التصنيع هو اختبار العزل وكذلك أثناء فحص واستلام التركيبات وكذلك قبل إطلاق التيار فى المشروعات. والعزل يقوم بعزل الفازات بعضها عن بعض ، وكذلك عزل وحماية البشر المتعاملين مع الكابل. وفى حالة كابلات الجهد العالي والمتوسط فإن العزل يكون من مادة XLPE " البولى إيثلين المتشابك وقد سبق الحديث عن سماته فى الفصل السابق .

24.1.4 حجاب العازل (شبه الموصل الثانى)

توضع مادة شبه الموصل semi – conductor في كابلات الجهد العالي والمتوسط بعد الموصل ، وتوضع أيضا بعد العزل مباشرة . ووظيفة هذه المادة هي جعل خطوط المجال الكهربي تسير بشكل موازي للموصل (شكل 24-4) وليس في اتجاه عمودي على اتجاه الموصل وبالتالى لا يحدث إجهاد على العزل.
وتصنع مادة شبه الموصل (الثانى) غالبا من مادة مطبوخة على الـ Phase أى مبثوقة وتكون صعبة النزع حتى أننا نحتاج إلى زجاجة مسطحة لنزعها عند عمل الوصلات.

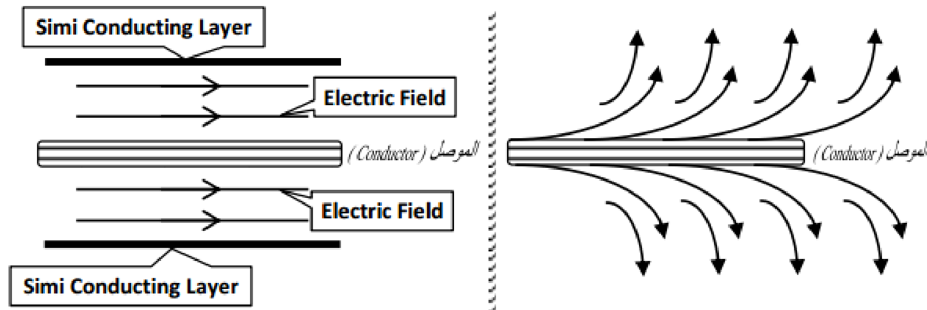


Figure 24-4 انتظام شدة المجال

يتكون حجاب العازل من جزئين هما:

- الحجاب العازل المساعد Auxiliarty Shield وهى شبه الموصل الذى تحدثنا عنه آنفا
- الحجاب الأساسي Primary Shield (وهى نفسها طبقة الـ Metalic sheath التالية)

لاحظ أنه إذا حدث ثقب في هذه الطبقة semi – conductor فإن ذلك يؤدي إلى تجمع خطوط المجال الكهربي بالثقب وتكون خطوط المجال عموديا على العزل وبالتالي انهيار العزل كما في الشكل 24–5.

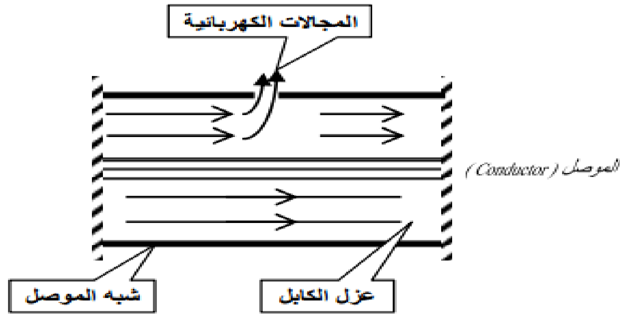


Figure 24-5 تأثير عدم اتصال شبه الموصل

24.1.5 الغلاف المعدني Metallic sheath

يوجد غلافان معدنيان يسميان تسليح (شكل 24–6) بكابلات الجهد المتوسط والعالي:

- الغلاف الأول داخلى: (وهى الطبقة التى نتحدث عنها الآن) ويوضع هذا الغلاف المعدنى على كل فازه من الفازات الثلاثة حتى يمكنها من تسريب تيار القصر – إن وجد – كما أنها تحمى الفازه من الرطوبة وتسرب المياه . وقد يصنع من الرصاص أو الألومنيوم أو النحاس.

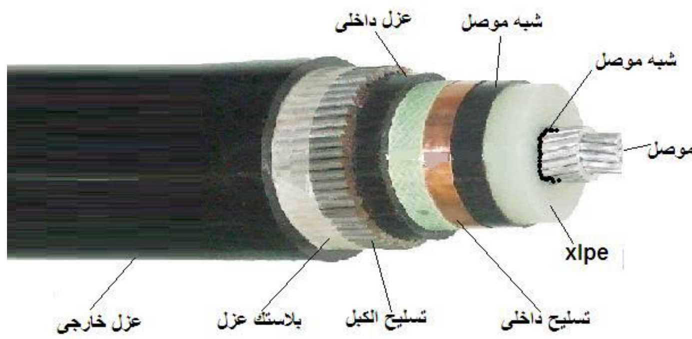


Figure 24-6 طبقات التسليح

ويصنع هذا الغلاف المعدنى الأول Metalic Sheath بأشكال مختلفة ، منها:

- شريط/ أسلاك من النحاس يلف على العازل بطريقة لولبية .
- أو شريط معرج من النحاس يوضع على العازل بطريقة طولية.
- وقد يكون غلافا مصمتا من الرصاص يتم لصقه بالطول عن طريق البثق Extruded– lead sheath حيث يتميز الرصاص بسهولة الصنع ومقاومته للتآكل إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة وغير مشع حراريا وهذا يعنى حبس الحرارة داخل الكابل لذلك يستعمل بعض سبائك الرصاص لتحسين تلك الخواص.
- كما يمكن استخدام الألومنيوم في صناعة الغلاف المعدني للكابلات نظرا لأنه أقوي من الرصاص . ولكن نظرا لارتفاع شدة معدن الألومنيوم الميكانيكية فإنه يكون من الصعب التعامل معه خصوصا عند عمليات ثني الكابل. إضافة إلى ذلك فإن الإجهادات

الميكانيكية الشديدة الناتجة عن التمدد الحراري في الكابل تؤثر تأثيرا سيئا على وصلات الكابل في حالة استخدام غلاف أملس من الألومنيوم . وقد تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام غلاف ألمونيوم معرج corrugted يمكنه امتصاص وتحمل تلك الإجهادات بطريقة أفضل من الغلاف الأملس.

- والغلاف المعدنى الثانى (خارجى) : وهو نفسه طبقة التسليح قبل الأخيرة التى سنتحدث عنها لاحقا.

24.1.6 مزايا الأغلفة المعدنية عامة

1- حصر المجال الكهربي داخل الكابل. ويعبر عن ذلك بمصطلح "تحجيب الكابل " أى عمل حجاب للكابل لمنع خروج المجالات الكهربية والمغناطيسية خارجه.
2- توفير مسار لتيار القصر الأرضي.
3- خفض الإجهادات الكهربية على العازل وخاصة المجالات العمودية على سطح العازل التي تتسبب في تلفه
4- الحد من التشويش على أجهزة الاتصالات بسبب تحجيب المجالات.
5- خفض مخاطر الصدمات الكهربية في حالة التأريض الجيد للكابل.
6- يوفر حماية ميكانيكية وكيميائية وطبيعية لمادة العازل .

24.1.7 الحشـــو أو (الفرشة) FILLING - BEDDING:

يوضع حشو بين الفازات وهى عبارة عن فرشة أو مخدة لكل فازة . وعادة ما يتم تصنيع هذا الجزء من مادة PVC لما لها من مميزات ذكرناها من قبل . و فائدة طبقة الحشو مايلى :

- العمل على استدارة الكابل وبالتالى يسهل سحبه وتمديده.
- حماية الفازات من شنبر التسليح الذى سيوضع لاحقا أن وجد .
- تساعد على عدم تسريب الماء والرطوبة إلى داخل الكابل
- تعمل كغطاء واقى من الصدمات الميكانيكية الخارجية
- حماية القلوب فى حالة وجود طبقات من شرائح الصلب

24.1.8 التسليـــح (التدريع) ARMOUR :

الكابلات قد تكون مسلحة وقد تكون بدون تسليح ، ولكل منهما مجالات للاستخدام ، فالكابل المسلح يستخدم فى الحالات التالية:

- الأرض الهشة ذات التراب أو الرمل الناعم .

- الأرض المعرضة باستمرار لمرور السيارات والمشاه والمركبات (ضغوط ميكانيكية)

والكابلات المسلحة تتمتع بحماية ميكانيكية ضد الإجهادات التي يتعرض لها أثناء عمليات النقل والتركيب أو إذا كانت عرضة للوقوع تحت أحمال كبيرة كمرور السيارات وخلافه. ومن فوائد هذه الطبقة أيضا المساهمة فى إيجاد مسار لمرور تيار العطل Earth Faults وتوفير مسار رجوع له إلى مصدره بدلا من الرجوع فى الأرض.

والغلاف المعدنى الخارجي يصنع من الصلب حتى لا يصدأ ويأخذ أشكالا مختلفة حسب الصور التالية:

- قد يستعمل طبقتان من شرائط الصلب بسمك يتراوح من 0.5 – 0.8 mm حسب قطر الكابل . وتدهن هذه الشرائط بالبيتومين.

- كما توجد طريقة أخرى لعملية التسليح الكابل ، وهي استخدام أسلاك من الصلب المجلفن كما بالشكل 7-24. ويمكن القول أن عملية تسليح الكابل هي خبرة فنية خاصة بكل دولة أو شركة تقوم بتصنيع الكابلات .



Figure 24-7 أسلاك التسليح

24.1.9 المشاكل المرتبطة بالغلاف Sheath Effect

عند مرور تيار في موصل الكابل ذي القلب الواحد فإن هذا التيار يولد حوله مجالا مغناطيسيا عبارة عن مسارات مقفلة من الفيض المغناطيسي تولد Induced EMF في غلاف الكابل نفسه وكذلك في أغلفة الكابلات المجاورة له ، هذه القوة الدافعة الكهربية تسبب تيارات تأثيرية ينتج عنها مفقودات الغلاف التى منها :

1– <u>مفقودات بسبب التيارات الدوامية في الغلاف</u>

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) وتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار.

ففى الشكل 24-8 عند مرور تيار في موصل الكابل (ب) يتولد مجال مغناطيسي يقطع غلاف الكابل (أ) المجاور له بحيث تكون شدة هذا المجال في الجهة القريبة من الكابل (ب) أكبر من شدته فى الجهة البعيدة عنه. ويتولد عن ذلك فرق في الجهد بين مقطعي غلاف الكابل (أ) وينشأ عنه تيارات دوامية (لاحظ أن التيارات الدوامية تسير عرضيا فى الكابل وليس طوليا كما يظن البعض ومن هنا سميت دوامية لأنها تشبه المويجات الصغيرة فى النهر التى تتحرك عمودية على اتجاه النهر).

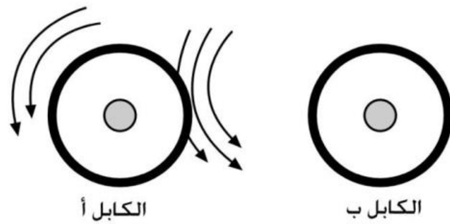


Figure 24-8

وينشأ عن هذه التيارات مفقودات في الغلاف تمثل حوالى 2% بالنسبة لمفقودات الموصل ويظهر تأثيرها في الكابلات ذات الأغلفة االمعدنية.

ملحوظة هامة :

يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية فى تغليف الكابلات لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون .
ومن هنا ظهرت أهمية حجب المجال المغناطيسى داخل الكابل ومنع انتشاره كما ذكرنا عند الحديث عن تركيب الكابل.

2- <u>تقليل المفقودات فى الغلاف عن طريق عمل Cross Bonding</u>

تستخدم طريقة الترابط المتقاطع للأغلفة Cross Bonding في الأنظمة ثلاثية الطور المكونة من ثلاثة كابلات أحادية الطور لمنع مرور التيارات المستحثة في أغلفة الكابلات ، فغالبا تربط أغلفة الفازات الثلاثة ذات القلب الواحد ربطا متقاطعا Cross Bonded بمعني أن يوصل غلاف الفاز الأول بغلاف الفاز الثاني والثالث كما يربط غلاف الفاز الثانى بغلاف الفاز الثالث كما فى الشكل 24-9 ، فهذا يمنع تيارات الغلاف نظرا لأن جهود الأغلفة الثلاثة مزاحة عن بعضها بزاوية 120 درجة وبالتالي يصبح مجموع الجهد على الغلاف يساوى صفر .

ويتم عمل الـ Cross Bonding عند صناديق التوصيل (Link Boxes).


Figure 24-9 Cross Bonding box

وعمليا يتم التأكد من تنفيذ هذا التصميم على الوجه المطلوب أثناء اختبارات الاستلام وذلك بحقن تيار على الموصل في حدود 100 أمبير ومن ثم قياس التيار المار بكل غلاف فلابد ألا يزيد عن 3 أمبير أي 3% من تيار الموصل (التفاصيل لاحقا).

هذا التوضيح مبني على فرض أن الكابلات الثلاثة موضوعة في شكل مثلث متساوي الأضلاع Trefoil أما إذا وضعت الكابلات على مستوي أفقي في خط مستقيم Flat فإن مفقودات الكابل لن تكون متساوية في الكابلات الثلاثة وستنشأ كمية من الفقد ولذلك نقوم بعملية التبديل لمواضع الكابلات (Transposition) للعمل على تقليل الـ Induced voltage في الكابلات وبالتالي تقل الفقد (لاحظ ترتيب الكابلات الثلاثة المفردة وكيف تم عكس هذا الترتيب مرتين فى شكل 24-10 على طول الكابل).

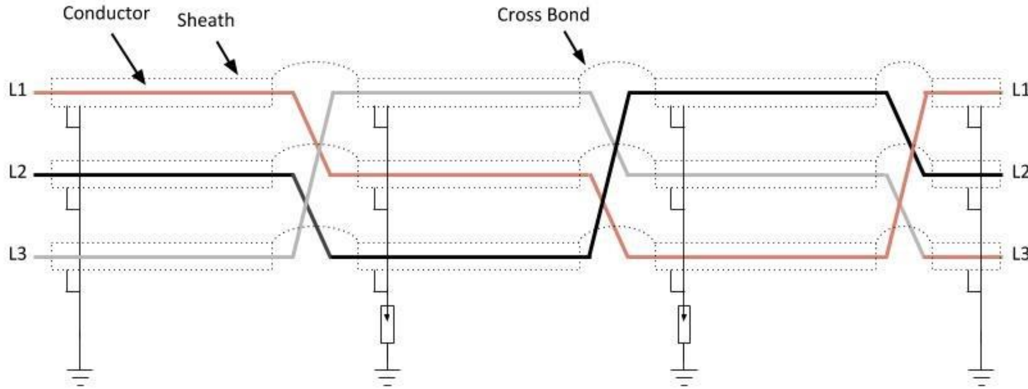


Figure 24-10 عملية التباديل فى الكابلات الأحادية

3- تأريض الغلاف المعدنى للكابلات

يجب تأريض الكابل المسلح فى الكابلات الـ Single phase وذلك للتخلص من الجهد الناشئ على هذا الغلاف بسبب المجال المغناطيسى الناتج عن مرور التيار في الموصل كما ذكرنا. ويكون التأريض بإحدى طريقتين : إما تأريض الغلاف من جهة واحدة أو من جهتين.

- فأما التأريض من جهتين فهو الأفضل للكابل حيث لا يوجد خطر على العازل أو الأشخاص العاملين في صيانة تلك الكابلات فالجهد يكاد يكون صفرا على الغلاف. ولكن المشكلة فى هذه الطريقة هى مرور تيارات فى الغلاف بسبب أن الدائرة مغلقة ومن ثم يكون لدينا Losses تتناسب مع مربع التيار المار في الغلاف .

- أما الطريقة الثانية فهى تأريض الغلاف من جهة واحدة ، وفى هذه الحالة تكون الدائرة مفتوحة وبالتالي لا يوجد Losses ، ولكن المشكلة هنا هى ارتفاع الجهد على الطرف الآخر من الكابل إلى قيمة قد تتسبب في حرق عازل الكابل ولذلك يوضع Sheath Voltage Limmitter كما فى الشكل 24-11 عند الطرف الآخر من الكابل وتعمل عند قيم معينة تضبط عندها لتفريغ هذا الجهد. والشكل 24-11 يظهر عملية التأريض مع عملية الـ Transpostion .

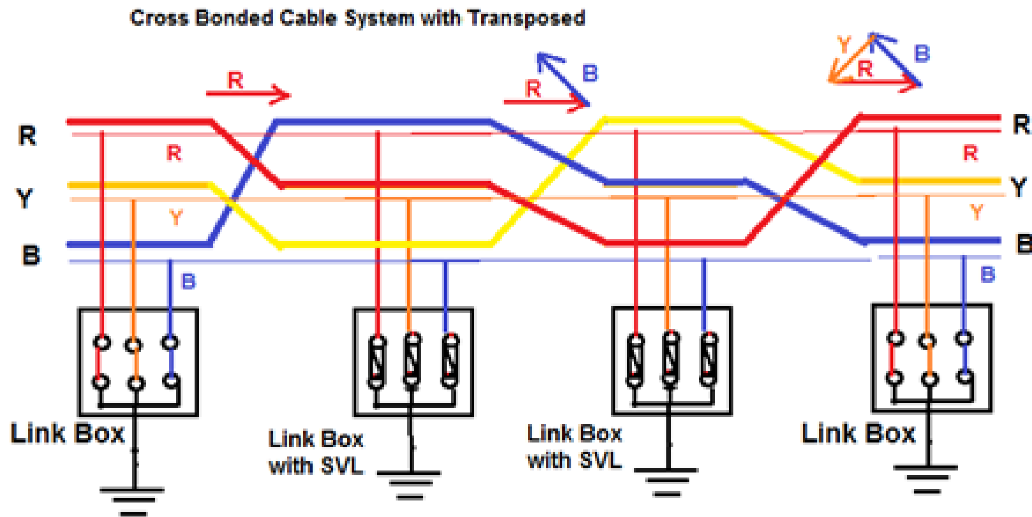


Figure 24-11 التباديل فى الكابلات الثلاثية

ملحوظة هامة :

يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية فى تغليف الكابلات لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون .

ومن هنا ظهرت أهمية حجب المجال المغناطيسى داخل الكابل ومنع انتشاره.

24.1.10 الغلاف الخارجي OUTER SHEATH:

الحماية الخارجية للكابل عبارة عن طبقة من مادة لها خواص معينة . توضع فوق الغلاف أو فوق طبقة تسليح الكابل بحيث تكون طبقة الحماية الخارجية هي آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة الخارجية والمواد الأخرى المحيطة به. والغلاف الخارجي للكابل يكون عادة من مادة خاملة كيميائيا أى لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات أو المواد العضوية ولذلك كانت مادة P V C (تستعمل فى هذه الطبقة مهما كان جهد التشغيل لأن دوره هنا ليس العزل الكهربى وإنما الحماية الكيميائية) هى الأكثر استخداما فى الكابلات كغلاف خارجى حماية للكابلات من التآكل فى التربة .

ويجب أن يكون غلاف الكابل مانع للهواء والماء ويغطيه بكامل طوله ، ويسمى هذا الغلاف (الجاكت) أو الغلاف الواقي. وقد يكون الغلاف الخارجي لونه أحمر أو أسود وليس للألوان أى دخل فى تحديد وتفضيل أى كابل عن الآخر .

والجدير بالذكر أنه عادة يكتب على الغلاف الخارجي للكابل بعض المعلومات الهامة من



Figure 24-12

قبيل اسم الشركة ومقاس الكابل وجهد التشغيل وتاريخ التصنيع كما فى الشكل 24-12.

24.1.11أطراف التوصيل الخارجية

أطراف التوصيل الخارجية هي تلك التوصيلات التي تستخدم عند ربط كابل مع الخط الهوائي وبالتالي يكون معرضا للظروف الجوية . ففى هذه الحالة يكون العزل مدرجا بدوائر مثل الشمسية تسمى Rain Shed لحماية العازل من الأمطار والأتربة ، كما فى الشكل 24-13.

ويتوقف عدد الشمسيات على قيمة الجهد ، فجهد 11 ك ف يستخدم معه عدد 2 شمسية ، بينما جهد 22 ك ف يستخدم معه 3 شمسيات ، وجهد 33 ك ف يستخدم معه 4 شمسيات. والشكل 24-14 يظهر تفاصيل أكثر عن هذه التوصيلة.



Figure 24-13 Rain Shed


①XG(phase-color tube)
EP088
②WRSG1(sealing tube)
EP089
③WRSG(insulation tube)
EP090
④JF(3-hole breakout)
EP091
⑤YRSG(stress control tube)
EP092
⑥SQ(three-hole rain shed)
EP093
⑦DQ(single-hole rain shed)
EP094
⑧(installation accessories)
EP095
cable lug
sealing tube
phase-color tube
rain shed
insulation tube
stress control tube
3-hole breakout
EP087

Figure 24-14



25

الخواص الكهربية للكابلات

يقصد بالخواص الكهربية للكابلات دراسة العناصر التالية:

1- مقاومة الموصل و مقاومة العازل

2- محاثة الكابل (Inductance)

3- سعة الكابل (capacitance)

4- بالإضافة إلى دراسة المجال الكهربي والمغناطيسي للكابل.

25.1 مقاومة الموصل CONDUCTOR RESISTANCE

ويرمز لها بالرمز R ، وتختلف المقاومة من مادة إلى أخرى ، وتتوقف قيمتها على مساحة مقطع السلك وطوله ومقاومته النوعية ، ووحدة قياس المقاومة هي الأوم.

ومقاومة الموصل للتيار المتردد تختلف عن مقاومته للتيار الثابت لنفس المادة . ويرجع ذلك إلى سببين أساسيين هما:

1. الظاهرة القشرية Skin effect حيث يميل التيار إلى المرور داخل الموصل في الطبقة الخارجية منه تاركا وسط الموصل ، وذلك بسبب توزيع الفيض المغناطيسي للتيار داخل الموصل نفسه كما سبق شرحه فى الباب الثانى عند الحديث عن الموصلات فى الخطوط الهوائية .

2. الظاهرة التجاورية Proximity effect وتنشأ هذه الظاهرة عند وجود كابلين متجاورين يقع كل منهما في المجال المغناطيسي للآخر.

وتسبب الظاهرتان السابقتان زيادة في مقاومة الموصل للتيار المتردد عن مقاومته للتيار المستمر.

25.1.1 مقاومة العزل Insulation resistance

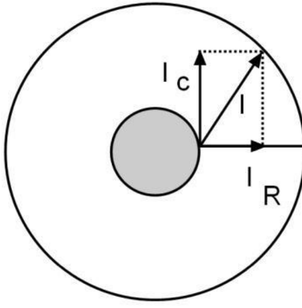


Figure 25-1

نظرا لعدم وجود مادة عازل كاملة (R = ∞) فإنه بمجرد تعرض الكابل للجهد يتولد فرق جهد بين الكابل وغلافه (حتى وإن كان الكابل غير محمل أي بدون مرور تيار في موصل الكابل) وبسبب هذا الفرق فى الجهد يمر تيار متسرب في عزل الكابل الذى يمكن اعتباره مكثفا غير نموذجى أى أنه مكثف بالتوازى مع مقاومة ، ولذا سيتسرب تيار I_C فى اتجاه عمودى على اتجاه المجال إلى الغلاف كما هو موضح بالشكل 25-1 نتيجة سعة الكابل ويتسرب تيار آخر I_R نتيجة لمقاومة العزل. وتعرف الزاوية δ بين التيار المحصل I وبين التيار I_C بزاوية فقد العازل ويجب أن تكون أصغر ما يمكن (تكون صفرا إذا كان العزل نموذجيا أى ليس لديه تيار متسرب فى المقاومة الأومية R (المقاومة الأومية تعتبر مالانهاية فى العزل النموذجى) حتى يمكن تقليل الفقد في العازل لذا يتم اختيار العازل بحيث تكون مقاومته كبيرة جدا .

إذن مقاومة عزل الكابل هي المقاومة لمرور التيار في الاتجاه القطري بين الموصل والغلاف.
ويمكن الحصول على قيمة مقاومة العزل للكابلات من المعادلة الآتية:

$$R_{ms} = \frac{\rho}{2l\pi} In(R/r_0) \qquad \text{ohm}$$

حيث

ρ = مقاومية مادة العزل (ohm.m).

l = طول الكابل (m).

R = نصف القطر الخارجي للكابل.

r_0 = نصف قطر الموصل.

ويوجد مزيد من التفاصيل حول مقاومة العزل فى الفصل الرابع من هذا الباب والخاص بالاختبارات حيث يمكن مراجعة المجموعة الخاصة باختبارات العزل.

25.2 محاثة الكابلات INDUCTANCE OF CABLE

يمكن استخدام نفس طرق حساب الـ Inductance للخطوط الهوائية في الكابلات الأرضية ، ولكن سيكون هناك أخطاء في النتائج وذلك بسبب تأثير الظاهرة السطحية والتقارب Skin and Proximity Effects وتأثير وجود الغلاف . ففى الكابلات منخفضة الجهد تكون المسافة بين الموصلات صغيرة بالمقارنة بأقطار الموصلات وعلى ذلك لا يمكن إهمال التأثيرات السابقة.

وعلى ذلك فمن الأفضل قياس الـ Inductance عند الاحتياج إليها لأن الحسابات تكون صعبة وغير دقيقة. أما في كابلات الجهد العالي فيتم إهمال تأثير الظاهرة السطحية والتقارب بسبب ازدياد سمك العازل وفى مثل هذه الكابلات يتم تغليف القلوب المنفصلة أو إحاطتها بورق معدني يتم توصيله بالغلاف

والأغلفة المعدنية تنشأ Mutual Indctance بين الموصلات وتؤثر بطريقة ملحوظة على المعاوقة الكلية ، وفى هذه الحالة يتم الأخذ في الاعتبار التأثيرات الناتجة عن الغلاف المعدني .

تعتمد الـ Inductance لموصلات الكابلات في النظم ثلاثية الطور على الشكل الهندسي لهذه للموصلات (شكل 25-2).

$$L = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D}{r}\right) \text{ mH/km}$$

$$L1 = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D_{12}D_{31}}{r\,D_{23}}\right)$$

$$L2 = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D_{23}D_{12}}{r\,D_{31}}\right)$$

$$L3 = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D_{31}D_{23}}{r\,D_{12}}\right)$$

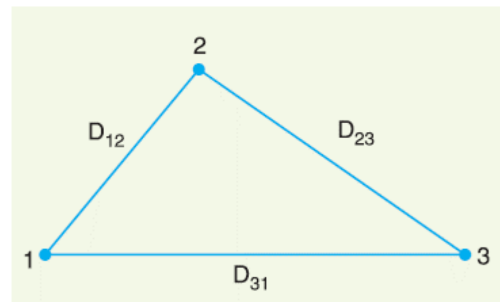


Figure 25-2

والقيمة المتوسطة للـ Inductance هي:

$$Lm = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D_m}{r}\right) \qquad \text{mH/km}$$

حيث D_m = متوسط البعد الهندسي المتبادل للبعدبين مركز الموصلات.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$$

$$L1 = L2 = L3 = 0.2\left(\frac{1}{4} + \text{In}\frac{D}{r}\right) \qquad \text{mH/km}$$

وبرغم أنه يمكن حساب الـ Reactance (ωL) باستخدام المعادلات المبينة أعلاه إلا أن قيم هذه الـ Inductance المدرجة في جداول خصائص الكابلات التي يصدرها مصنعي الكابلات هي القيم التي يتم الحصول عليها بالقياس وذلك لأن مقطع الموصلات في كثير من الكابلات ليس دائريا وأيضا لأن القيمة الفعلية للـ Inductance تعتمد على النظام المستخدم في تأريض الغلاف ونظام الترابط بين الأغلفة وبعضها وعلي ما إذا الكابل له درع أم لا.

وبصفة عامة فإن قيمة الـ Inductance الحثية للكابلات تقع في حدود 0.08–0.24 أوم/ كم.

25.3 سعة الكابل CABLE CAPACITANCE

السعة الكهربية هي مقدار الشحنة التى يحملها المكثف مقسوما على جهده (c=q/v)، والمكثف نظريا هو لوحين موصلين بينهما عازل ، ومن ثم يمكن اعتبار وجود مكثف بين موصل الكابل (القلب) والغلاف المعدنى (sheath) ، وتنشأ أيضا مكثفات بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض .

في حالة الكابل ذي القلب المنفرد أو الموصل الواحد فإن السعة C بين الموصل والغلاف الخارجي أو الحجاب الخارجي هي:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{In(R/r_0)} \quad F/m$$

حيث

ε_0 = سماحية الفراغ (8.83 x 10−12 F/m)

ε_r = السماحية النسبية لمادة العزل.

r0 = نصف قطر الموصل.

R = نصف القطر الداخلي للغلاف.

أما في حالة الكابلات ثلاثية القلوب فإن السعة بين قلب وآخر (C_c) والسعة بين القلب والأرض(C_s) أو بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض تكون كما في الشكل 25-3.

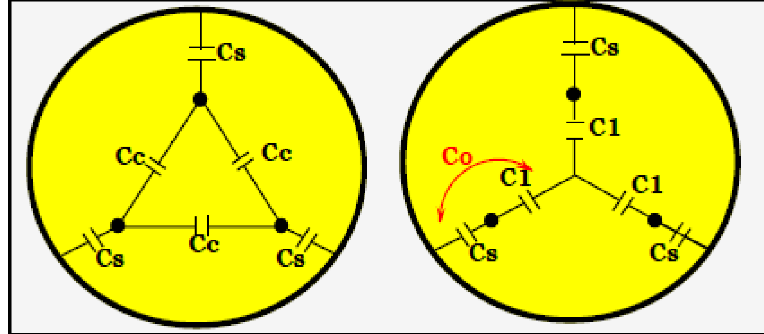


Figure 25-3

من الصعب حساب السعة لهذه الكابلات ، حيث أن اتجاه المجال الكهربي في هذه الكابلات ليس نصف قطري، ويتم تعيين سعة الكابلات في هذه الحالة عن طريق القياس.

وجدير بالذكر أنه يمكن إيجاد قيمة تقريبية لسعة هذه الكابلات من المعادلة الآتية:

$$C = \frac{0.111\varepsilon_r}{In\frac{a^2(3R^2-a^2)^3}{r_0^2(27R^6-a^6)}} \quad \mu F/m$$

حيث

r0 = نصف قطر الموصل (mm).

R = نصف القطر الداخلي للغلاف أو الحجاب (mm).

a = المسافة بين الموصلات (mm).

25.4 المجال المغناطيسى للكابلات :

عند مرور التيار الكهربى فى أى موصل ينتج عنه مجال مغناطيسى واتجاه هذا المجال يتحدد حسب "قاعدة فلمنج لليد اليمنى " .

ويجب الحرص على أن تكون أطوال الكابلات في المباني قصيرة قدر الإمكان لأن التقاط المجال الكهرومغناطيسي يتناسب مع طول الكابل. وبما أن أي موصل يحمل تياراً يشع حوله مجالاً مغناطيسياً فإنه يمكن أيضا أن يلتقط مجالاً مغناطيسياً موجودا حوله وهذا يؤثر سلباً على المعدات المجاورة ويمكن تعطيلها ويؤثر أيضا على توصيل الطاقة المطلوبة.

وكما ذكرنا سابقا يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية فى تغليف الكابلات لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون .

والشكل 25-4 يظهر مقارنة بين قوة المجال المغناطيسى خارج الكابل فى حالات مختلفة.

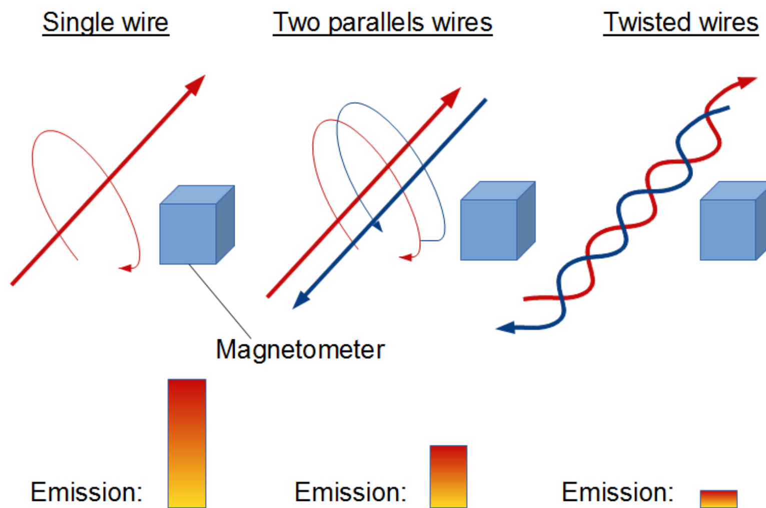


Figure 25-4 قوة المجال المغناطيسي خارج الكابل حسب طريقة اللف

25.5 المجال الكهربى للكابلات

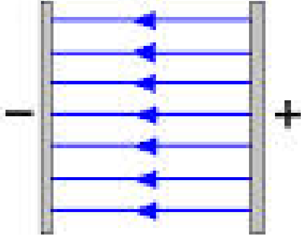


Figure 25-5

يتشابه الكابل مع المكثف فى عدة نواحى ، فالمكثف عبارة عن لوحين معدنيين بينهما عازل. كذلك الكابل فهو يحتوى على موصلات معدنية بينها عازل. وعند تغذية المكثف بتيار مستمر نجد الآتى:

اللوح الموصل بالطرف السالب : يحمل شحنة سالبة .
اللوح الموصل بالطرف الموجب: يحمل شحنة موجبة (الإكترونات مسحوبة منه). وتتحرك الالكترونات بواسطة قوة لها اتجاه تمثل بخطوط تسمى بخطوط "المجال الكهربى" .

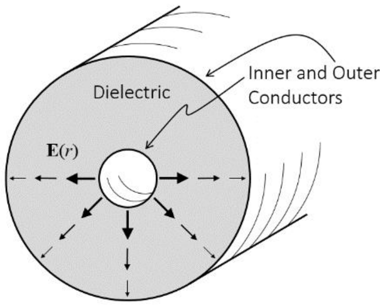


Figure 25-6

ونفس الشئ فى الكابلات أى يحدث داخله مجال كهربى إذا وصل بتيار مستمر فلدينا بالكابل موصلين (داخلى وخارجى وبينهما عازل سيظهر عليه فرق جهد وتتراكم شحنة على الكابل وكأنه مكثف مشحون شكل 25−6 .
وحتى مع التيار المتردد فإن الكابل يكون غير قادر على تفريغ هذه الشحنة حيث تكون سرعة التردد عالية جدا . وعلى هذا يكون الكابل عند تغذيته بتيار متردد كأنه مكثف.

ويعرف المجال الكهربي المنتظم بأنه المجال الذي قيمته ثابتة عند جميع النقاط ويمكن الحصول عليه من خلال صفيحتن متوازيتين مساحتهما كبيرة والمسافة بينهما صغيرة مشحونتين بنفس مقدار الشحنة لكن الأولى موجبة والثانية سالبة.

في المجال الكهربي المنتظم تكون شدة المجال متساوية وفي نفس الاتجاه . فمثلا المجال الكهربي بين لوحين تكون شدة المجال الكهربي متساوية وتعادل :

$$\vec{E} = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

حيث:
E شدة المجال الكهربي ب فولت/متر،
ΔV فرق الجهد بالفولت
Δx المسافة بين اللوحين بالمتر.

25.5.1 قياس شدة المجال الكهربي Electrical field

شدة المجال عند نقطة = الجهد مقسوما على بعد تلك النقطة ، و شدة المجال تقاس بوحدة v/ m ، ويعزى الاهتمام بقياس شدة المجال إلى أنه العنصر المؤثر على جودة العزل ، فيهمنا أن نعرف ما هو أقل وأقصى شدة للمجال داخل الكابل.

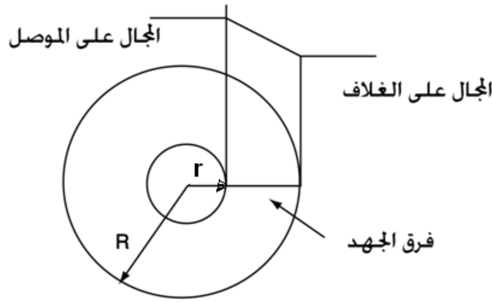


Figure 25-7

وكما هو واضح من الشكل 25−7 فإن أقصى شدة مجال داخل لكابل يكون عند سطح الموصل و لذا تستخدم طبقة شبه موصلة حول القلب لتنظيم المجال.

أقل شدة مجال تكون عند سطح الغلاف المعدنى الداخلي كما هو موضح بالشكل وتحسب شدة المجال عند سطح الموصل من العلاقة:

$$E = \frac{V}{X \ln \frac{R}{r}}$$

واضح من المعادلة السابقة خطورة معدل تغير الجهد بصورة مفاجئة كما هو الحال عند الحواف المدببة أو الأطراف لأنه طبقا للمعادلة السابقة ستكون هذه الأماكن هى الأعلى فى شدة المجال ، ومن ثم تكون الأخطر على حالة العزل فى هذه الأماكن .

25.5.2 تأثير المجال الكهربى على الأطراف :

المجال الكهربى للكابل دائما موجود حتى فى حالة عدم تحميل الكابل طالما الكابل متصلا بالمصدر ، لأنه لا يعتمد على التيار بل ينشأ نتيجة وجود فرق جهد بين الموصل الحامل للتيار والغلاف المؤرض ، وفى حالة زيادة الجهد عن الحد الطبيعى فإن تأثير المجال الكهربى سوف يظهر وتحدث فرقعة أو شرارة أو تفريغ . و تركيز خطوط المجال فى نقطة يؤدى إلى ارتفاع درجة الحرارة فى هذه النقطة وبالتالي يؤدى إلى انهيار العزل عندها.

وعند الحاجة لعمل Gland فى نهاية الكابل يلزم قص جزء من حجاب العازل وحجاب الموصل ابتداء من نهاية الكابل وذلك لجعل التوصيل سليم كهربيا ولكن قص الحجاب يؤدي إلى عدم استمرارية انتظام المجال الكهربي، ويصبح المجال مركزا على حافة الموصل مما قد يؤدي إلى انهيار عازل الكابل .

ويلزم عند عمل أطراف نهاية للكابل أخذ تلك القوي في الاعتبار حتى لايحدث انهيار للكابل عند الأطراف ويتم إضافة أنبوب Stress Control Tube لتقليل تلك الإجهادات بقدر الامكان وتقليل تركيزها بجعلها موزعة على مساحة أكبر كما فى الشكل 25-8 الذى يبين كيف نستخدم أنبوبة تخفيف الضغط Stress Control Tube حيث يلاحظ انتظام وتخفيف تركيز المجال الكهربي بعد استعمال الأنبوبة. وهناك صورة أخرى فى نهاية الفصل السابق لـ Stress Control Tube .

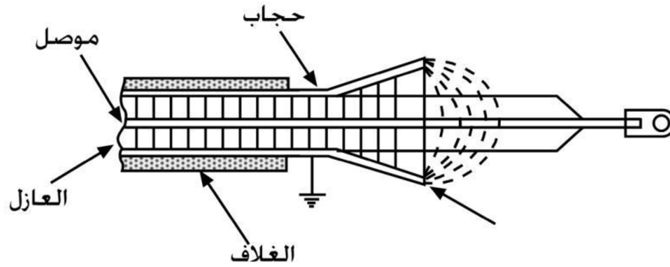


Figure 25-8 Stress Control

ولحماية المواد العازلة عند الأطراف يجب تركيب أشرطة أو حوارف تركب على العزل لتزيد من سمكه (شكل 25-9).



Figure 25-9

25.5.3 تأثير المجال الكهربي على ظاهرة WATER TREE :

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدى إلي نشوء ظاهرة التشجير المائى (Water Treeing) – لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم – وينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربي عند نقط النتوءات وقلته عند الجزء الأملس من الكابل. و هذا الاختلاف يتسبب فى وجود شقوق فى الكابل تتفرع فى جميع الاتجاهات مثل الشجر و تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات وهي إحدى أسباب انهيار العزل. راجع الصورة الموجودة فى الفصل الثالث من هذا الباب الخاص بالخصائص الكهربية للكابل.

26
اختبارات الكابلات

تخضع الكابلات للعديد من الاختبارات بعد إنتاجها و كذلك بعد تمديدها. ويمكن تقسيم هذه الاختبارات عموما إلى أربع فئات:

- اختبارات روتينية. Routine Tests.
- اختبارات خاصة. Special Tests.
- اختبارات نوعية. Type Tests.
- اختبارات ما بعد التركيب. Electrical Tests after Installation.

وقد قامت اللجنة الكهربية الدولية (International Electrotechnical Commission (IEC بوضع تفاصيل هذه الاختبارات لكل نوع من أنواع الكابلات وذلك طبقا لنوع العزل المستخدم و نطاق الجهود التي تستخدم فيها هذه الكابلات. وتعطي هذه المواصفات بالتفصيل قيم جهود الاختبار والشروط اللازمة لها مثل درجة الحرارة وأنواع الجهود المستخدمة وطول ونوع العينة التي تستخدم لكل اختبار.

ويمكن الرجوع إلى تفاصيل الاختبارات لمختلف أنواع الكابلات في المواصفات التي أصدرتها IEC والتي نوردها هنا وهي: IEC: 55-1, 141, 229, 230, 502, 840, 885 و 60228
وسنشير هنا سريعا المجموعات الثلاثة الأول من هذه الاختبارات ، ثم يتم التركيز فقط على النوع الأخير لارتباطه الوثيق بعمل معظم المهندسين.

26.1.1 الاختبارات الروتينية:

يتم إجراء هذه الاختبارات على جميع أطوال الكابلات المصنعة وذلك للتأكد من أن هذه الكابلات تحقق المعايير المطلوبة. فعلي سبيل المثال تعتبر الاختبارات الآتية اختبارات روتينية للكبلات البوليمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف وذلك طبقا للمواصفة IEC-840:

- اختبار التفريغ الجزئي (Partial Discharge).
- اختبار تحمل الجهد.
- الاختبار الكهربي على الغلاف اللامعدني.

أما الاختبارات الروتينية بالنسبة للكبلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت فهي في مدي جهد حتى 275 ك ف طبقا للمواصفة IEC-141:

- اختبار مقاومة الموصل.
- اختبار السعة.
- اختبار معامل الفقد Tan δ .
- اختبار الجهد العالي.

26.1.2 الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة):

تُجري هذه الاختبارات على عينات من الكابلات ، وقد تكون هذه العينات بكرة كاملة من الكابل المنتج في بعض الأحيان ، أو أطوال محددة من الكابل حسب الشروط التي تحددها مواصفات الـ IEC لكل اختبار.

ومن أمثلة الاختبارات الخاصة الواجب إجراؤها على الكابلات ذات العوازل البلمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف طبقا ل ICE 840 مايلي:

- فحص الموصل (Conductor Examination).
- قياس مقاومة الموصل.
- قياس سمك العزل والأغلفة اللامعدنية.
- قياس سمك الغلاف المعدني.
- قياس الأقطار.
- اختبار التصلد الساخن Hot St Test لكل من البولي إثيلين المشبك XLPE ومطاط الإثيلين بروبيلين EPR.
- قياس السعة.
- قياس الكثافة للبولي إثيلين عالي الكثافة HDPE.

أما الاختبارات الخاصة المطلوب إجراؤها على الكابلات المعزولة بالورق المشرب والمملؤة بالزيت في مدي جهد حتى 275 ك ف وطبقا لـ IEC-141 فهي:

- تغير عامل الفقد (Tan δ) مع درجة الحرارة.
- اختبار أمان العزل.
- اختبار الجهد الدفعي الساخن Hot Impulse Voltage Test.

26.1.3 الاختبارات النوعية:

يتم إجراء الاختبارات النوعية قبل أن يقوم المصنع بإنتاج نوع معين من الكابلات على المستوي التجاري وذلك لبيان أن هذا المنتج يفي على نحو مرض بمتطلبات الأداء. ولا توجد ضرورة لتكرار القيام بهذه الاختبارات ما دام الكابل قد إجتازها بنجاح إلا إذا قام المنتج بعمل تغييرات في التصميم أو المواد المستخدمة في صناعة الكابل مما قد يؤثر على أدائه.

ومن أمثلة هذه الاختبارات النوعية التي يجب إجراؤها على الكابلات البلمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف (IEC 840):

- اختبار ثني يتبعه اختبار للتفريغ الجزئي.
- اختبار قياس عامل الفقد ($\tan\delta$).
- اختبار جهد مع دورة تسخين يتبعه اختبار قياس للتفريغ الجزئي.

ويتم القيام بهذه الاختبارات على عينات من كبلات لا يقل طولها عن 10 متر. وجدير بالذكر أن هذه الاختبارات النوعية يجب أن تتم بالترتيب التعاقبي المدرج أعلاه.

26.2 اختبارات الموقع للكابلات الجديدة والاختبارات أثناء الخدمة

هذه الاختبارات يتم إجراؤها عقب تركيب الكابل مباشرة للتأكد من سلامة الكابل قبل تحميله بالتيار. وكذلك تجرى هذه الاختبارات أثناء وجود الكابل بالخدمة ، فقد تحدث له أعطال أو تحدث تركيبات متصلة به أو وصلات إلخ ، ويترتب على ذلك احتياجنا إلى عمل اختبارات تساعد فى التأكد من سلامة التركيبات الجديدة أو سلامة الوصلات أو تساعد فى تحديد ماهية العطل ومكانه.

وأهم هذه الاختبارات هى (عدد الاختبارات ونوعها يتوقف على المواصفات المتبعة) :

1. اختبار تحديد الأوجه
2. اختبار استمرارية التوصيل
3. اختبار مقاومة الموصل
4. اختبار قياس سعة الكابل Cable Capacitance
5. اختبارات جودة العزل (اختبار قيمة مقاومة العزل – اختبار مدة التحمل – اختبار جهد انكسار العزل – اختبار جودة العزل Tan δ)
6. اختبارات سلامة غلاف الكابل Sheath Test
7. اختبارت صناديق الـ Cross Bonding
8. اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق Earth resistance measurement of link boxes
9. اختبار قياس الممانعة الصفرية والممانعة الموجبة zero & positive impedance

10.اختبار الجهد العالي (باستخدام الـ DC, AC, or Very low frequency, VLF)

وفيما يلى تفصيل لهذه الاختبارات .

26.3 اختبار تحديد الأوجه PHASE CHECKING

ليس بالضرورة أن تكون الفازات فى الكابلات مميزة بألوان مختلفة بل قد تكون جميعها سوداء أو حمراء ، ومن هنا تظهر أهمية هذا الاختبار للتأكد من أن ما نسميه phase–R فى الناحيتين هو بالفعل الـ Phase –R .
ويعتبر هذا الاختبار ضروريا للتأكد من صحة الأوجه قبل بداية جميع الاختبارات حيث يترتب على تشغيل الدائرة فى وجود خطأ في الأوجه مرور تيار قصر عالي.

ويتم تحديد الوجه بواسطة تأريضه من الجهة البعيدة وترك باقي الأوجه غير مؤرضة كما فى شكل 26–1 ، فإذا كان الـphase صحيحا فإن جهاز الـ (Megger) يعطى قراءة مقاومة تساوى صفر للوجه المؤرض ثم يعطى قيمة عالية إذا رفع الأرضي عن نفس الوجه بينما تعطي بقية الـPhases دائما قيمة مقاومة عالية سواء كان الأرضى موصلا بالوجه الذى نختبره أم لا ، فهذا يدل على صحة الوجه من الجهتين. وينفذ هذا الاختبار على بقية الأوجه، ويكتفي بأقل جهد اختبار لتحديد الأوجه حيث أننا هنا لا نقيس شدة عزل.

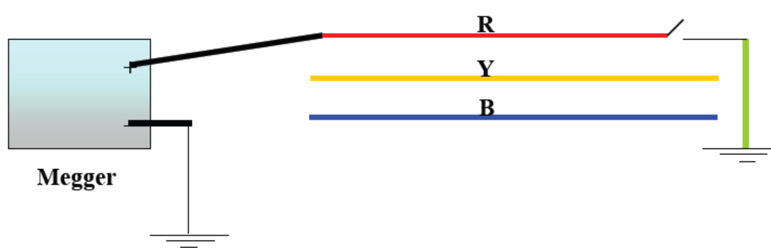


Figure 26-1 اختبار تحديد الأوجه

26.4 اختبار الاستمرارية

يتم إجراء ذلك الاختبار للتأكد من عدم وجود أى قطع فى الكابل ويستخدم أيضا فى حالة تحديد صحة توصيل الأوجه مع بعضها قبل التركيبات وذلك عندما يتم توصيل أطراف كابلين لاسيما فى حالة وجود عدد من الـ Joints قبل عمل أطراف التوصيل النهائية لتجنب الخطأ فى الترتيب .

فمثلا لتحديد فازة R يتم توصيل الفازة R بسلك الـ Shield من جهة وقراءة قيمة المقاومة بواسطة جهاز الميجر بين الـ R والـ Shield من الجهة الأخرى كما فى شكل 26–2 ، فإذا كانت قراءة المقاومة تتراوح من 0 إلى 20 ك أوم فتدل على الاستمرارية ، أما إذا كانت قراءة قيمة عالية مثلا 10 ميجا أوم فيدل ذلك على حدوث تبديل للفازات أو وجود قطع فى الموصل وهكذا فى باقى الفازات.



Figure 26-2 اختبار الاستمرارية

26.5 اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر

DC Conductor Resistance

يصنع الموصل عادة من معدن ذي مقاومة كهربائية منخفضة ويقوم هذا الموصل بدور توصيل التيار الكهربي والطاقة الكهربية ولذلك لابد من اختبار مقاومة الموصل للتأكد من عدم زيادتها عن القيمة المسموح بها حسب مواصفات IEC (اللجنة الدولية الكهروتقنية) حيث ينتج عن ذلك مجموعة من المفقودات Losses تعمل على رفع درجة حرارة الموصل وتحد من قدرة حمل الكابل للتيار (Current Carrying Capacity) المعتمدة على أقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الموصل بصفة مستمرة.

ويمكن إيجاد مقاومة أي موصل طوله L ومساحة مقطعه A من المعادلة التالية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية للموصل (Resistivity) وتقاس بالـ mΩ

ويتم قياس مقاومة كل موصل لعينة من الكابل بطول لا يقل عن متر، وباستخدام التيار المستمر فقط من خلال استخدام جهاز Micro ohmmeter ، الذى يقوم بحقن DC Current وقياس فرق الجهد على الطرفين المراد قياس المقاومة بينهما وتحسب المقاومة من العلاقة التالية :

$$R = \frac{V}{I} \qquad (\Omega)$$

يتم قياس درجة الحرارة أثناء الاختبار ويحسب منها مقاومة الموصل لكل Km عند درجة حرارة $20^{o}C$ حسب العلاقة التالية :

$$R_{20} = \frac{R(measured)}{L(1+\alpha_{20}(T-20))}$$

حيث :

L : الطول الفعلي للكابل (Km)

R_{20} : مقاومة الموصل عند $20^{o}C$ (Ω / Km)

R : القيمة المقاسة لمقاومة الموصل لوجه واحد (Ω)

α_{20} : المعامل الحراري لمقاومة المعدن عند درجة حرارة $20^{o}C$ وتساوي بالنسبة للنحاس مثلا = 0.00393

T : درجة حرارة الموصل عند الاختبار

ويتم مقارنة R_{20} المقاسة بقيمته المسموح بها حسب المواصفة IEC −60228 .

لاحظ أن استخدام التيار المستمر ضرورى لأنه فى حالة استخدام AC Supply فإننا نقيس المعاوقة Z التى تشمل المقاومة بالإضافة إلى الـ Reactance .

26.5.1 توصيلات الجهاز

نقوم بعمل قصر (Short) على جميع الموصلات في النهاية البعيدة وتوصيل طرف جهد وتيار على الوجهين كما فى الشكل 26−3:

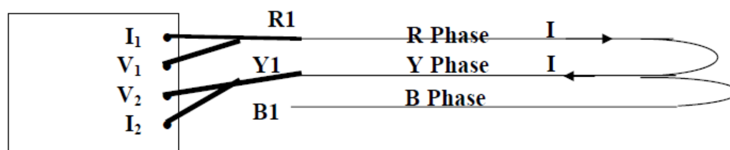


Figure 26-3 قياس المقاومة

وفى هذه الحالة فإن الجهاز يقيس مجموع مقاومتي الوجهين R & Y وتعاد القياسات بنفس الطريقة لباقي الأوجه (R&B – Y&B) ثم يتم حساب مقاومة كل وجه من العلاقات التالية :

$$R = \frac{(R+Y) - (Y+B) + (R+B)}{2}$$

$$Y = (R+Y) - R$$

$$B = (R+B) - R$$

في حالة استخدام أسلاك لعمل قصر في النهاية البعيدة فإنه يجب أن تكون ذات مقاومة منخفضة (مساحة مقطع كبيرة) ويجب طرح مقاومة القصر وكذلك أسلاك الجهاز من القيمة المقاسة.

26.6 اختبار قياس سعة الكابل (CABLE CAPACITANCE)

تحسب سعة الكابل لكل كيلومتر $(C^{\backslash})$ من العلاقة :

$$C^{\backslash} = \frac{C_{measured}}{L}$$

حيث :

$C_{measured}$: القيمة المقاسة للسعة الكلية للكابل وتقاس μF

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة جهاز (capacitance meter). حيث يتم توصيل طرف الموصل بالجهاز والطرف الآخر مؤرض كما فى الشكل 26-4. وتقاس السعة بوحدة الميكرو فاراد (µF)

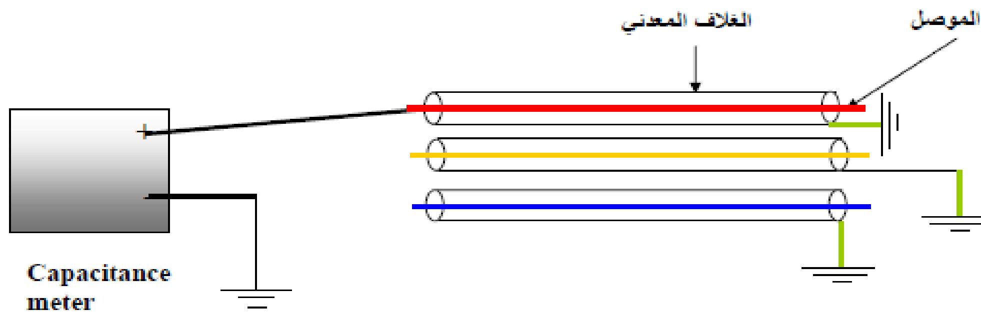


Figure 26-4

وقد اكتسبت سعة كابلات الجهد العالي والفائق أهمية اقتصادية كبيرة نظرا لاعتماد كل من تيار الشحن (Charging Current) والقدرة الغير فعالة (VAR) والفقد في العزل عليها اعتمادا مباشرا كما تلعب هذه السعة دورا هاما في تحديد مسافة نقل الطاقة باستخدام الكابلات (الطول الحرج للكابل Critical Length of Cable) ، وكلما قلت قيمة السعة كلما كان ذلك أفضل من وجهة نظر العوامل السابق ذكرها.

26.7 مجموعة اختبارات العازل

نظرا لعدم وجود مادة ذات عزل كامل $(R = \infty)$ فإنه بمجرد توصيل الكابل عند طرف الإرسال بمصدر جهد فإنه سيتولد فرق جهد بين الموصل والغلاف المعدني (Metallic Sheath) فيمر تيار متسرب (Leakage) خلال العزل في اتجاه إشعاعي (Radial) من الموصل إلى الغلاف وتعرف مقاومة العازلية بأنها المقاومة لمرور هذا التيار.

ملحوظات هامة:

- يتم قياس جودة العزل بين الموصلات وبعضها وبين الموصلات والأرض حيث تكون القيمة المقبولة للعزل وفقا للقاعدة التى تقول أن كل واحد كيلوفولت من الكابل يقابله واحد ميجا أوم . فمثلا لو كان كابل بجهد تشغيل 11 ك ف فتكون أقل قيمة مقاومة مسموح بها هى 11 ميجا أوم .
- يتم عمل الاختبار قبل وبعد اختبار الجهد العالي المشروح تفصيلا فى نهاية الاختبارات
- يتم إجراء هذا الاختبار بواسطة الميجر(5000 فولت) حيث يتم قياس العازلية مابين الفازات الثلاثة وبعضها وبين الفازات الثلاثة والأرضي وقد تصل قيمة العازلية إلى (100ميجا أوم فأكثر) فى حالة لو كان الكابل جديدا .أما لو كان الكابل قديما فقد تصل إلى (1ميجا أوم).
- مدة هذا الاختبار دقيقة واحدة. والسبب فى ذلك أن الكابل يسحب فى البداية تيار شحن لمكثفاته Charging Capacitive Current بالإضافة إلى تيار التسرب إن وجد ، وعند التشغيل لمدة 60 ثانية ينخفض الـ Capacitive Current بالتدريج ويستمر فقط تيار التسرب إن وجد وهو الذى يحدد جودة العزل.
- لا تؤخذ مقاومة العازل كمعيار يقاس به ســـــلامة العازل إلا في حالة وجود تســـرب مياه أو رطوبة إلى العازل حيث تؤدي إلى انخفاض كبير في مقاومة العازل مما يشـــير إلى ســـوء حالته في هذه الظروف (وعمليا نقارن بين قيم الفازات الثلاثة أو قيم دائرة مع دائرة أخرى مماثلة).
- تعتمد مقاومة العزل على نوعية العزل ودرجة الحرارة. وعلى عكس مقاومة الموصل فإن مقاومة العازل تتناسب عكسيا مع طول الكابل ودرجة الحرارة. ولذا فهذا الاختبار يتم أولا بعد غمر العينة فى ماء درجة حرارته 20 درجة مئوية لمدة ساعة على الأقل ، والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجة الحرارة القياسية . ويعاد الاختبار بعد غمر العينة فى درجات حرارة أعلى (تحددها المواصفات) والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجات الحرارة أثناء التحميل.

وتعتمد مقاومة العازل على عدة عوامل هي :

1- الأبعاد الهندسـية للكابل وهي مسـاحة مقطع الموصـل وسـمك العازل وطول الكابل ولذا كان لابد من الرجوع لمواصفات الاختبار التى تعطى طول العينة التى ستوضع تحت الاختبار ، فتغيير الأبعاد يعنى تغيير النتائج.
2- مدى احتواء العازل على أي رطوبة أو بخار ماء
3- نوع وتكوين العازل
4- درجة الحرارة
5- عمر الكابل

ويتم مقارنة القيمة المقاسة بالمواصفة IEC 60840.

ومن أهم الأجهزة المستخدمة فى هذه الاختبارات جهاز الميجر (شكل 26-5) ، الذى يستخدم لقياس عازلية الكابل و قياس مقاومة العطل باستخدام جهد يولد داخليا حتى 5000 فولت. ويتم ضبط الميجر وفقا لنوع الجهد وذلك كما يلي:

500 فولت وحتى 1000فولت لاختبار معدات الضغط المنخفض.

2500 فولت لاختبار معدات الجهد المتوسط أكبر من 1 ك ف

5000 فولت لاختبار معدات الجهد المتوسط أكبر من 6.6 ك ف



Figure 26-5 جهاز الميجر

Table 26-1

تحديد جهد الاختبار بالميجر

جهد التشغيل	كابل جديد	كابل قديم	قيمة مقاومة
upto1.1KV	500 V dc for 1 min.	1.0KV dc for 1 min.	50MΩ
11KV	1.0KV dc for 1 min.	2.5KV dc for 1 min	200MΩ
33KV	2.5KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ
66KV	5.0 KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ

26.7.1 اختبار العازل باستخدام الـ Hipot

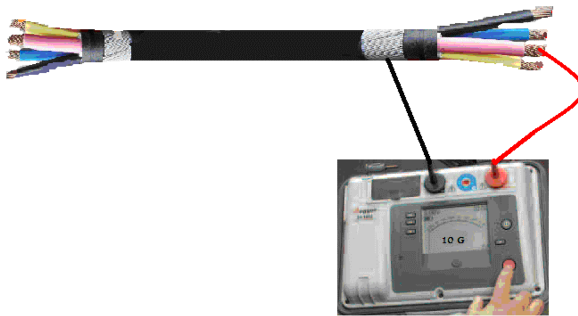
هناك أربعة اختبارات أساسية ضمن مجموعة اختبارات عزل الكابل ، الأول منها فقط يكون باستخدام الميجر وهو اختبار قياس مقاومة العزل ، بينما لا يصلح استخدام الميجر فى الباقي ، بل يجب استخدام جهاز الـ HiPot لأن طبيعة الاختبار تحتاج إلى جهد أعلى من المتاح فى الميجر كما سنرى.

وكلمة "Hipot " تعني جهد عالي وهو إختصار (High Potential) ، وفيما يلى تفاصيل الاختبارات الأربعة.

26.7.2 اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance Test

يجيب هذا الاختبار على السؤال التالى: هل مقاومة العزل عالية بدرجة كافية؟

فى هذا الاختبار تقاس قيمة مقاومة العزل بين كل Phase على حدة وبين الغلاف المعدنى للكابل كما فى الشكل 26-6 التى تعرض طريقة قياس عزل الفازة الحمراء. وتقاس أيضا مقاومة العزل بين كل two phases .



قياس شدة العزل Figure 26-6

ويستخدم هذا الاختبار لتحديد مقاومة العطل وبالتالى تحديد الجهاز المناسب استخدامه لقياس مسافة العطل كما سنرى فى الفصل التالى.

ويجب تفريغ الشحنة على الكابلات بعد إجراء الاختبار لأن مكثفات الكابل تظل مشحونة بجهد الاختبار (تذكر أن الميجر له جهد DC) ومن ثم هناك خطر على العاملين أن لمس أحدهم الكابل وهو مشحون ، ولذا نقوم بتفريغ هذه الشحنات بتوصيل الكابل بالأرض.

26.7.3 اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown Test

يجيب هذا الاختبار على السؤال : عند أي جهد ينكسر العزل بين موصلين ؟

ونستخدم فى هذا الاختبار جهاز الـ Hipot ، حيث يأخذ موصلين معزولين وغير متصلين ببعضهما Open Circuit ويطبق عليهما فولتية عالية جدا (تحدد طبقا لجهد العزل من المواصفات) ، ويراقب سريان التيار بينهما بعناية . و في الحالة المثالية لن يسري تيار مطلقا ، فإذا مر تيار أكثر من اللازم فهذا يعني أن النقطتين أو الموصلين لم يتم عزلهما بصورة حسنة وهناك تسريب فى نقطة ما ، و بذلك يفشلا في الاختبار.

ويتم هذا الاختبار باستخدام جهاز يسمى (Hipot tester) (شكل 26-7) حيث يطبق على الكابل الجهد اللازم لعمل الاختبار ويعرض من خلال الشاشة الموجودة به قيمة التيار المتسرب الذى يفترض أن يكون صغيرا جدا. ويحتوى الجهاز أيضا على (overload protection) حتى إذا زادت قيمة التيار عن حد معين يقوم بعملية الفصل . مدة الاختبار تصل إلى 60 ثانية أو أكثر .



Figure 26-7 Hi-pot Tester

لاحظ أنه قد يكون هناك فجوة بالعزل فى أحدهما ، وهذه يصعب اكتشافها بجهد الميجر العادى ، ولذا يجب استخدام الجهد العالي لكشف هذه النوعية من الأعطال.

26.7.4 اختبار مدة تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test

يجيب هذا الاختبار على السؤال : هل سيتحمل الكابل الجهد المتوقع للمدة الزمنية المطلوبة؟

حيث نقوم بوضع الجهد المطلوب (طبقا للمواصفات) للفترة الزمنية المحددة ونراقب سريان التيار . ففى الحالة المثالية يجب أن لا يسير أى تيار خارج الموصل طوال مدة الاختبار.

26.7.5 اختبار كفاءة العزل (الـــ Tan delta(δ))

يسمي هذا الاختبار أيضا (loss angle) و(Dissipation factor) ويستخدم هذا الاختبار لقياس مدي جودة عازل الكابل حيث يستخدم للتنبأ بالعمر الافتراضي للعازل.

في الحالة الطبيعية يكون في حالة المكثف التيار يسبق الفولت ب 90 درجة وفي في حالة الكابل يمكن تمثيل الموصل والعازل كمكثف ولكن نتيجة الإضافات التي تضاف لمادة العازل لاتكون الزاوية مساوية ل 90 درجة في هذه الحالة الزاوية بينهم تسمي δ loss angle كماهو موضح في الشكل 26-8 .

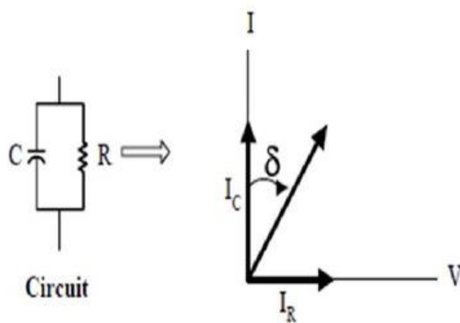


Figure 26-8

حيث بزيادة تلك الاضافات في مادة العازل يزداد (resistive current) I_R بزيادة الزاوية يعني زيادة ولكن الكابل المثالي الذي تكون فيه الزاوية مساوية للصفر وكلما اقتربت للصفر أصبح العازل أفضل .

والكابل فى هذا الاختبار لابد أن يكون (energized) ، ثم يقوم (tan delta controller) بأخذ القياسات حيث يتم أخذ القياسات على خطوات متتالية .

في البداية يكون جهد الاختبار مساويا لـ V_o (normal line to ground voltage) ، فإذا كانت قراءات tan delta جيدة أي أن الزاوية تقترب من الصفر يكون الكابل جيد مبدئيا ، وفي هذه الحالة نغير جهد الاختبار لتصل قيمته من 1.5 ثم إلى ضعف قيمة V_o .

يتم إجراء الاختبار على الكابل باستخدام VLF AC HIPOT وتعنى Very Low Frequency أى عند تردد منخفض جدا يصل إلى 0.1Hz وليس 50 Hz وذلك لسببين:

1- الأول أنه إذا تم الاختبار عند 50 Hz سنحتاج إلى مصدر طاقة عالي جدا (very high power supply) ولكن عند استخدام تردد 0.1Hz نحتاج مصدر طاقة أقل 500 مرة من المصدر الذي نحتاجه في حالة 50 Hz.
2- السبب الثاني أن قيمة tan delta تزداد بنقصان قيمة التردد مما يجعل عملية القياس أسهل وفقا للعلاقه التالية

$$\text{Tan Delta } (\delta) = I_R / I_C = 1/(2\pi fCR)$$

و الاختبارات الأربعة السابقة هي أدوات تستعمل لفهم بشكل أفضل كيف سيؤدي الكابل عمله و كذلك لمراقبة أيّ تغييرات في أداءه مستقبلا. وبالطبع يجب أن يكون جهد الاختبار عاليا لأننا نتعامل مع مقاومات عالية جدا والجهد الصغير لا يكشف عيوب هذه المقاومات حتى لو كان العزل مخدوشا بالعين المجردة ، ومن هنا لزم استخدام الجهد العالي.

علما بأن اختبار انهيار و انكسار العازل Dielectric breakdown testing يستعمل في مراحل تصميم و تأهيل المنتجات حيث يساعد فى توصيف أقصى جهد للكابل. كما أنه في الكثير من المواصفات يتطلب إجراء اختبار تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test على كل كابل منتج.

26.7.6 مقارنة قيم الاختبارات:

قيم مقاومة العازل يجب أن تكون وفقا للبيانات المرفقة من المصنع وأن لم تتوافر يجب أن تكون متطابقة مع قيم الجدول 26-2

Table 26-2

Insulation Resistance Test Values Electrical Apparatus and Systems

Nominal Rating of Equipment in Volts	Minimum Test Voltage, DC	Recommended Minimum Insulation Resistance in Megohms
250	500	25
600	1,000	100
1,000	1,000	100
2,500	1,000	500
5,000	2,500	1,000
8,000	2,500	2,000
15,000	2,500	5,000
25,000	5,000	20,000
34,500 and above	15,000	100,000

وأن لم تتوافق مع هذه القيم يجب أن يتم التحقيق في ذلك والتدقيق أكثر في العينة المختبرة.

26.8 اختبار الغلاف الخارجي DC SHEATH TEST

يستخدم الغلاف الخارجي فوق الغلاف المعدني أو فوق طبقة تسليح الكابل (Armor) بحيث تكون آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة والمواد المحيطة به وعادة يستخدم في صناعته البولي فينايل كلورايد (PVC) أو مادة البولي ايثلين عالي الكثافة (HDPF)

ويجب إجراء الاختبار على الغلاف الخارجي بغرض التأكد من أنه لم يحدث أي شروخ أو تلف فيه أثناء عملية التركيب ويتم هذا الاختبار بتسليط جهد مستمر 10 kV لمدة دقيقة واحدة بين الطبقة المعدنية (metallic Sheath) وبين الغلاف الخارجي المصنوع من الـ PVC ، و نقوم فى هذا الاختبار بتأريض مادة الـ PVC بطلائها بمادة Semi Conductor Material وبالتالي تكتمل الدائرة الكهربية و نستطيع أن نحكم على مدى تحمل الـ SHEATH للجهد .

ونسجل قراءة تيار التسريب (Leakage Current) ويعتبر الاختبار ناجحا في حالة عدم حدوث انهيار للغلاف (No Breakdown) ، ويوضح الشكل 26-9 طريقة الاختبار :

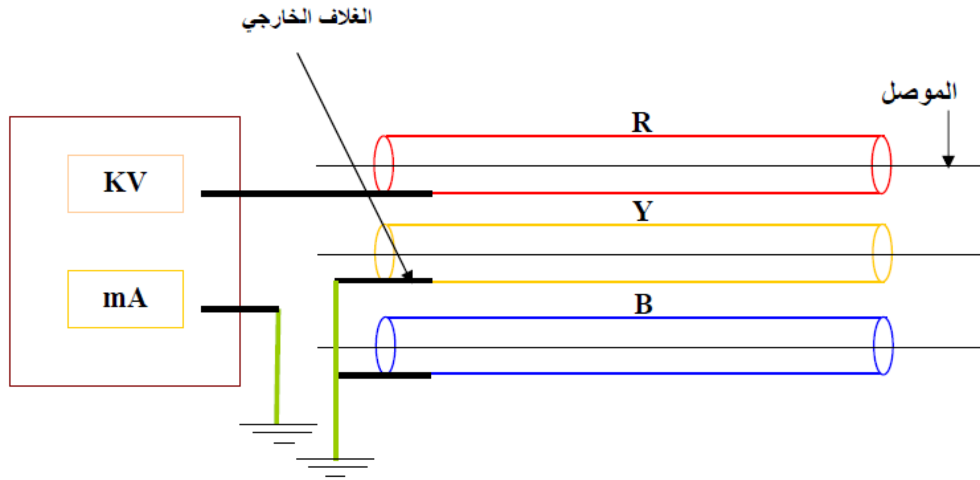


Figure 26-9 اختبار عزل الغلاف الخارجي

26.9اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل

Contact Resistance Test of Link Boxes

وتعمل في نهاية الاختبارات للتأكد من جودة الربط وذلك بقياس المقاومة باستخدام Micro–ohmmeter وهذا يؤثر في نظام الـ (Cross Bonding) المستخدم لمنع مرور التيار في الغلاف المعدني ويعمل الاختبار بين جميع نقاط الربط بين الوصلات Links وبين وصلات SLV. ويجب أن لا تزيد المقاومة عن $20\mu\Omega$.

26.10 اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني

Cross Bonding Verification Test of Metallic Sheath

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) وتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار.

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة حقن تيار متردد (AC Current) للثلاثة أوجه (على الموصلات) مع عمل قصر من الجهة الأخرى وقياس التيار في الغلاف المعدني ويجب أن لا يزيد التيار في الغلاف عن 3% من التيار المحقون وتوضح القيمة صحة الترابط.

وسبب وجود التيار العالي (الذى يزيد عن 3%) يرجع لعدة عوامل منها أن تكون هناك أطوال غير متساوية أو قد تكون هناك دوائر Live بجوار الكابل مع رطوبة التربة أو خطأ في التصميم.

بما أنه لا يفترض توصيل الأغلفة بالأرضي إلا عند بعض صناديق التوصيل فإنه يتم عزلها عن الأرض بواسطة مقاومة غير خطية (Non Linear Resistance) تعمل على الحد من الجهد المستحث للغلاف في حالة حدوث الأعطال ولذا تعرف بأنها Sheath Voltage Limiter, SVL حيث تنخفض قيمة مقاومة العزل فتصبح مسارا لتيارات الغلاف إلى الأرض، أما في الوضع الطبيعي فتبقى مقاومتها عالية ولذا تختبر للتأكد من عازليتها ويجب أن لا تقل قيمة العازلية عن 1GΩ عندما تختبر بجهد 1000V.

26.11 اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق

Earth resistance measurement of link boxes

تعتبر طريقة هبوط الجهد (fall of potential method) الطريقة الأكثر استخداما لقياس مقاومة الأرض ، وفي هذه الطريقة (انظر الشكل 26-10) يمثل E إلكترود التأريض و P و C هما الكترودان مساعدان ، واذا مر تيار بين E و C وكان فرق الجهد بين E و P هو V ، فإن خارج القسمة V/I هي مقاومة الأرضي . ويسمى جهاز قياس مقاومة الأرض بـ Earth tester. فى الشكل S هى مصدر تيار (current source) ذو جهد ثابت. و الـ A جهاز أميتر بينما الـ V جهاز فولتميتر.

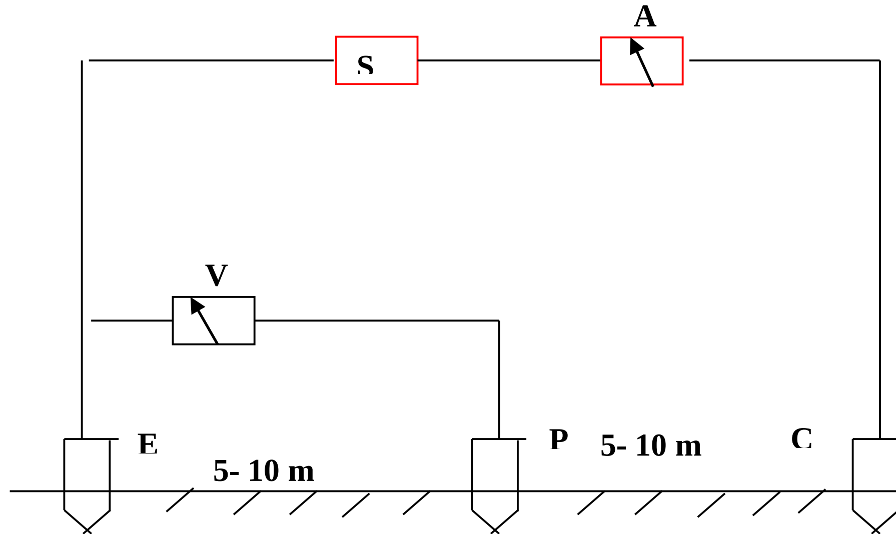


Figure 26-10 قياس مقاومة الأرضى

وتتأثر مقاومة التربة بعدة عوامل منها :

نوع التربة .

محتوى الرطوبة.

نوع الأملاح المذابة ودرجة تركيزها .

درجة الحرارة والضغط .

الحجم الحبيبي.

وعند قياس مقاومة الأرض عند أي موقع يستحسن أن تجرى عدة قياسات بقيم مختلفة للمسافة بين الالكترودات وذلك للتوصل إلى القيمة المتوسطة (Average Value). ويجب أن لا تزيد مقاومة الأرض عن $10\ \Omega$. وبوجه عام فإن قيمة المقاومة اللازمة تتناسب عكسيا وحجم تيار القصر ، فكلما كبر هذا التيار وجب أن تصغر المقاومة.

26.12 اختبار PARTIAL DISCHARGE TESTING: (PD)

التفريغ الجزئي (partial discharge) يعني حدوث شرارات كهربية صغيرة خلال العزل في كابلات الجهد العالي والمتوسط. وكل شحنة تفريغية هي نتيجة انكسار عزل فراغ هوائي أو بسبب وجود شروخ في العزل أو تلف طبقة شبه الموصل الخارجية أو تلف الوصلات فى الكابل وعدم كفاءة النهايات (splices and termination) . ويؤدى PD إلى تآكل العزل مع الوقت وفي النهاية إلى انهياره بالكامل .

ينص الكود الكهربى IEC على أن هذه التفريغات الكهربية هي أول إشارة إلى تدهور حالة العزل ، فمنذ أكثر من 50 عام والشركات تقوم بعمل اختبارات (PD) على كافة المعدات الكهربية المعزولة فالمعلومات الناتجة من هذا الاختبار توضح كفاءة العزل وتأثيره على سلامة المعدة ككل. ولأنه دائما ما يحدث PD عندما يكون العزل في طريقه للانهيار فيمكننا التنبؤ بمستقبل الوصلات في الكابل وجودة النهايات أثناء التركيب.

وهناك أنواع من PD tests منها :

Online PD test

يتم إجراء الاختبار أثناء عملية التشغيل الطبيعية للكابل فهو أقل تكلفة من offline test ولا يحتاج إلى فصل الكابل وخروجه من الخدمة تحت ظروف قياسية من الجهد ودرجة الحرارة وهذا الاختبار غير مدمر ولا يسبب اى ارتفاع فى درجة حرارة الكابل .

:Offline PD test

يتميز هذا النوع من الاختبار بأنه يوفر الفرصة لقياس استجابة الكابل لمستوى جهد معين والتنبؤ بأداء الكابل بالمستقبل بدون إحداث fault كما أنها تتميز بقدرته على تحديد مكان الخطأ بالتحديد مما يمكن العامل من التخطيط لصيانة الكابل.

26.13اختبارات تحمل الجهد العالي

انهيار أي كابل تحت تأثير الجهد يتوقف على العوامل التالية:

- زمن تأثير الجهد
- شكل الموصل
- درجة الحرارة
- كمية الفراغات الموجودة بالكابل

وتنشأ هذه الفراغات بالكابل (شكل 26-11) نتيجة دورة تحميل الكابل وازدياد الحرارة ما بين أقصى حمل وأدنى حمل مما يؤدي إلى تمدد وانكماش الكابل والذي يؤدي بدوره إلى تكون الفراغات والتي يتأين الغاز بداخلها نتيجة الجهد العالي للكابل مما يؤدي إلى انهياره في النهاية .

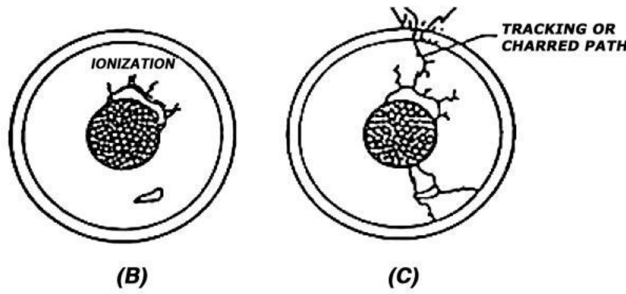


Figure 26-11

والجدير بالملاحظة هنا أن الجهد المستخدم عند اختبار الكابل القديم أقل من الجهد المستخدم عند اختبار الكابل الجديد ، والغرض من هذه الاختبارات كشف هذه العيوب.

26.13.1 اختبار الجهد العالي لدوائر 132 ك.ف ، أو أعلى

يتم إجراء الاختبار للتأكد من سلامة الكابل وقدرته على تحمل جهد وتيار التشغيل لفترة طويلة وللتأكد من عدم وجود عيوب داخلية بالكابل (مثل الوصلات الداخلية التى تربط الكابلات ببعضها) حيث يتم اختيار قيمة جهد الاختبار وفقا للقاعدة التى تقول أن قيمة جهد الاختبار تساوى أربعة امثال جهد العزل المقنن لفترة 15 دقيقة على مرحلة واحدة أو عدة مراحل فمثلا لو كان جهد التشغيل للكابل 11 ك ف فيكون جهد الاختبار هو 44 ك ف. ويمكن إجراء هذا الاختبار باستخدام جهد ثابت أو جهد متردد وستتم المقارنة بين ميزات وعيوب كل نظام لاحقا.

يعتمد هذا الاختبار على الجهد الكهربى العالي المتصل بالكابل لاظهار أى عيوب صناعية مثلا مثل فراغات هوائية أو ضعف وصلات أو شرخ بالعزل حيث أنه بتطبيق جهد عالي ومرور تيار عالي يؤدى ذلك إلى زيادة حرارة الكابل وبالتالي يؤدى إلى زيادة عمق الفجوة وبالتالي زيادة ضعف العزل – إن كان فعلا ضعيفا – مما يسبب انهياره أثناء الاختبار.

ويعتبر اختبار الرنين ذو التردد المتغير (Variable Frequency) أحد الطرق المستخدمة في اختبارات الجهد العالي كما في الشكل وفكرته أن حدوث الرنين سيتسبب فى مرور تيار عالي يمكن أن نجعله يساوى تيار التشغيل بالتحكم فى L الموجودة بالدائرة ، حيث يعتبر الكابل عند الاختبار كالمكثف الكهربي وعند ربطه على التوالي مع الـ (Reactor) فإن الدائرة الناتجة هي دائرة رنين (Resonance) ووبحسب ترددها من المعادلة :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

حيث :

C : السعة الكهربية للكابل بالـ F.

L : (Inductance) (H).

وتكون قيمة تيار الاختبار تساوى

$$I_{test} = \omega CV$$

وقد نحتاج إلى استخدام two reactors على التوازي كما في الشكل 26-12 نظرًا لزيادة سعة الكابل بزيادة طوله مما يؤدي إلى زيادة تيار الاختبار حسب المعادلة السابقة والحل يكون باستخدام two Reactors و يتم توصيلهم على التوازى ، وبالتالي نحصل على تيار كبير مع ثبوت فى قيمه الجهد كما هو موضح بالشكل.

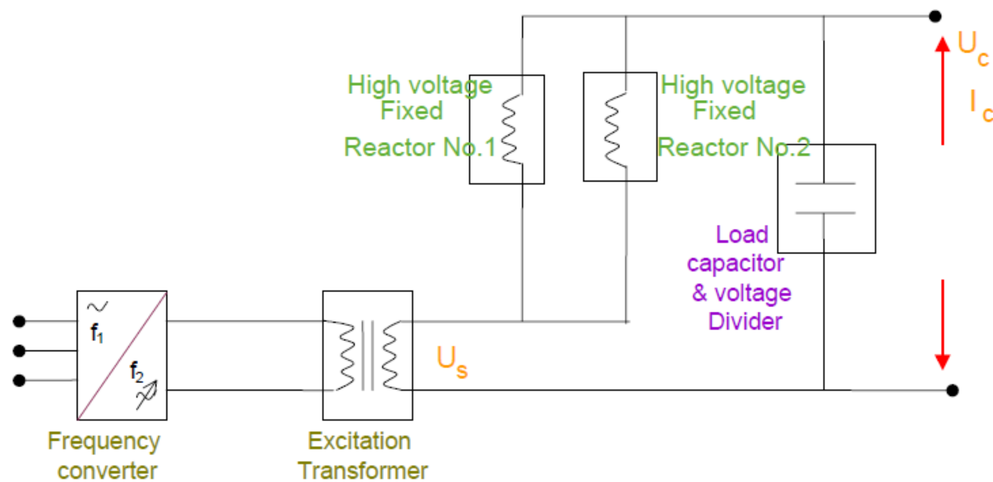


Figure 26-12 اختبار الجهد العالى للكابلات

وفي حالة كون جهد الاختبار أعلى من جهد الـ Reactor فإننا نقوم باستخدام two reactors على التوالي كما هو في الشكل 26-13 حيث يتضاعف الجهد ولا تتغير قيمة التيار.

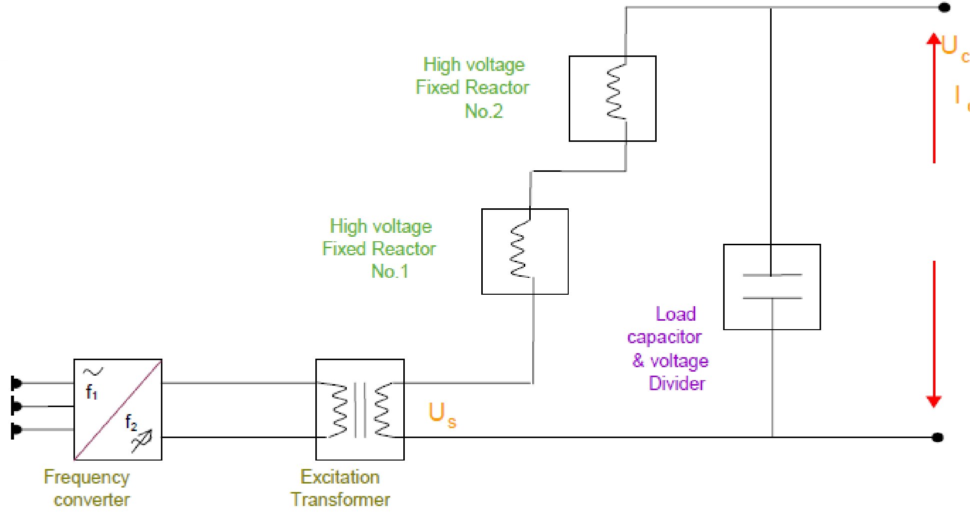


Figure 26-13

ملحوظة:

اختبارات جميع أنواع كابلات الضغط العالي يتم إجراؤها فى مصر من خلال مركز أبحاث الجهد الفائق الموجود بطريق مصر اسكندرية الصحراوى .

26.13.2 تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة :

عند إجراء اختبار على كابلات الضغط العالي لاينصح باستخدام DC Supply لاختبار العازل و ذلك لأنه بمجرد استخدام الـ DC سينشأ مجال مغناطيسى ثابت و بمجرد ثبات المجال المغناطيسى فإنه من الممكن أن يتسبب فيما يسمى ب Water Tree مما قد ينشأ عنه حدوث Break Down فى العازل .

وهناك مشاكل أخرى منها:

1- بعض الأعطال مثل الفراغات داخل الوسـط العازل (Bubbles) أو القطع والخدش (Scratching) بعمق محدد داخل الوسط العازل لا يظهر أثرها **مع استخدام الــ HVDC** ، وهذه المشاكل تؤدي إلى حدوث تفريغ جزئي (Partial Discharge) عند تطبيق الجهد المتردد بعد إدخال الكابل للخدمة مما يؤدي إلى انهيار الوسط العازل مع مرور الزمن رغم تجاوزه الاختبار ومن ثم تضيع قيمة هذا الاختبار.

2- توزيع الحمل الكهربي على جسم الكابل والوصـلات والنهايات يكون حسب المقاومة النوعية (ρ) وليس حسب السماحية (ϵ) كما في حالة (AC) مما ينتج عنه توزيع غير متساوي للإجهاد الكهربي إضافة إلى أن توزيع المجال الكهربي عند الوصـلات والنهايات سيكون مختلف تماما عن التوزيع الفعلي عند التشغيل.

- الجهد المستمر DC يتناسب طرديا مع المقاومة $E_1 / E_2 = \rho_1 / \rho_2$
- أما المتردد AC فيتناسب عكسيا مع السماحية $E_1 / E_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1$

3- ينشأ بسبب هذا الجهد تراكم بعض الشحنات (Space Charge) خصوصاً فى الفراغات بين الكابل والملحقات (Accessories) وأيضا قريباً من الحدود الداخلية والخارجية للمادة العازلة ، وعند تشغيل الكابل بجهد الشبكة المتردد (AC) تتضاعف هذه الشحنات وتشكل (Stress) على الكابل مما يؤثر سلباً على عمر الكابل وملحقاته ويجعله عرضة للانهيار بشكل سريع .

4- يؤدي إلى تدهور حالة الكابل نتيجة تزايد التشـــجير المائي والكهربي (Water & Electrical Treeing) وتضاعفها بعد دخوله الخدمة .

5- تبين أن هناك بعض العيوب لا يمكن كشفها بالجهد المستمر (DC) إلا إذا وصل جهد الاختبار إلى 8 أضـــعاف الجهد المقنن للكابل (U_0) ، وهذا يبين عدم قدرة الجهود المعطاة في المواصـــفات والتى تصل إلى ثلاثة أمثال (U_0) فقط من التأكد من سلامة الكابل . لذا كان لابد من البحث عن البديل.

26.13.3 تأثير استخدام الـــ HVAC

عند إجراء الاختبار على كابلات الضغط العالي باستخدام Supply AC ستظهر مشكلة أخرى مختلفة عن المشاكل الخاصة بالـ HVDC وهى أن الكابلات الطويلة تحتاج إلى تيار شحن كبير وبالتالي سنحتاج إلى جهاز كبير و ملفات كبيرة وهذا كله مكلف ، لذلك لايستخدم الـ AC Supply . والجدول التالي يقارن بين الأسلوبين السابقين.

	AC	DC
حجم معدة الاختبار	كبيرة	صغيرة
طاقة الاختبار	عالية	منخفضة
التأثير على عمر الكابل	غير مؤثر	مؤثر بشكل كبير
الشحن الفراغية	لا يسبب شحن فراغية	يسبب شحن فراغية
الفعالية	فعال لجميع الكابلات	فعال للكابلات الزيتية
الكشف عن العيوب	يكشف جميع العيوب	يكشف عيوب التأثير الحراري
التشجير	لا يكون تشجير	يكون تشجير
تقارب القيمة مع الجهد الشبكة	مقارب لجهد الشبكة	لا يشابه جهد الشبكة

26.13.4 استخدام تردد منخفض VLF(Very Low Frequency)

تبين حتى الآن عدم ملائمة استخدام DC supply و أيضا AC supply للأسباب السابقة التى تم شرحها ، والحل الأمثل هو شئ وسطى بينهما أو ما يسمى (Very Low Frequency) (VLF) . وبما أنه AC فلن تظهر مشاكل الـ DC السابقة ، وبما أنه منخفض التردد جدا فسيسحب تيار منخفض لانخفاض التردد حسب المعادلة I = ω C V

ويتم إجراء الاختبار بطريقة بسيطة عن طريق توصيل مخرج الجهد العالي المعزول لجهاز VLF بموصل الكابل (conductor) الجاري إجراء الاختبار عليه وتوصيل طرف الأرضي مع طرف الجهد الثانى للجهاز بالـ (grounding shield) كما هو واضح في الشكل 26-14.

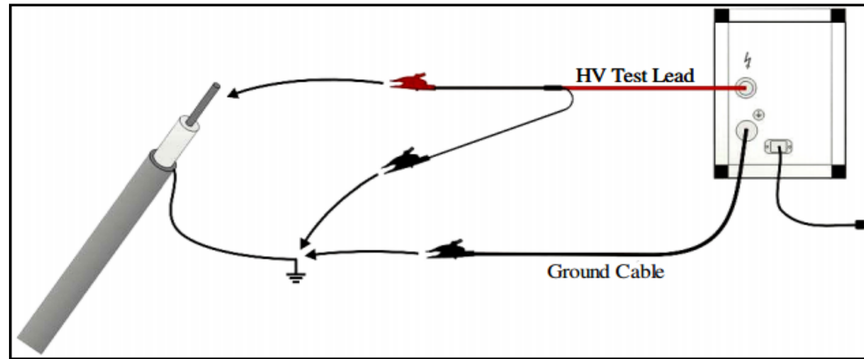


Figure 26-14

ثم يتم وضع الكابل على جهد الاختبار لمدة معينة وفقا للمواصفة IEEE 400.2 (المواصفة تنصح بأن يكون جهد الاختبار ثلاث أضعاف الجهد العادى (Normal line to ground voltage) ($3V_o$) لمدة من 30 إلى 60 دقيقة.

و الجدول 26-3 يبين قيم أقصى جهد يتم وضع الكابل عليه وفقا للـ IEEE 400.2

Table 26-3

Cable Rating phase to phase (RMS)	Installation Test phase to ground	Acceptance Test phase to ground	Maintenance Test phase to ground
kV RMS	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Table 1: IEEE 400.2 VLF Test Voltage Levels for Sinusoidal, Cosine-Rectangular. Voltage Pe values are shown in brackets for Cosine-Rectangular and Squarewave.

إذا اجتاز الكابل هذا الاختبار فسيكون نسبة فرصة الكابل على تجنب اي انهيار في العازل أثناء تشغيله تصل إلى 95%. ويتم إجراء هذا الاختبار عند تردد منخفض 0.1 HZ كما يوجد أيضا ترددات 0.02 &0.05 هرتز.

Table 26-4

قيمة اختبار الجهد العالي للكابلات

جهد التشغيل	جهد الاختبار		تيار التسرب	
	كابل جديد	كابل قديم	كابل جديد	كابل قديم
upto1.1KV	3KV	660V	0.5mA	2mA
11KV	18KV	6.5KV	0.5mA	2mA
33KV	60KV	19.5KV	0.5mA	2mA
66KV	115KV	38KV	0.5mA	2mA

فى الكابلات القديمة يتراوح جهد الاختبار ما بين $2U_0 - 2.5U_0$ حسب عمر الكابل . وهذا الاختبار (VLF) تختبر به كابلات الجهد المتوسط لتحديد ما إذا كان هناك عطل فيها أم لا كما سيتم شرحه بالتفصيل فى الفصل التالى.

27

إكتشاف أعطال الكابـلات

الكابلات الكهربية هى أقل عناصر الشبكة الكهربية تعرضا للأعطال و ذلك نتيجة تعرض الكابلات لاختبارات عديدة –كما شرحنا سابقا– حيث يتم اختبار الكابلات فى المصانع فور تصنيعها لضمان جودتها و كذلك اختبارات بعد التركيب و أيضا قبل التشغيل مما يقلل فرص حدوث أعطال فى الكابلات ، و لكن هذا لا يمنع حدوث بعض الأخطاء والأعطال نتيجة لعدة أسباب نذكرها فى الجزء التالى.

ومن الضرورى معرفة نوع العطل فى الكابل قبل إجراء الاختبارات اللازمة عليه ، علما بأن أعطال الكابلات لا تعتمد على جهد التشغيل فهى نفسها متكررة فى كابلات الجهد المتوسط والجهد المنخفض على السواء كما أن الأجهزة التى تقوم باكتشاف وتحديد مكان الأعطال لا تعتمد على جهد التشغيل ، حيث يتم تشغيلها والبحث عن العطل أثناء فصل الكابل من الخدمة أى بدون جهد. مع الأخذ في الاعتبار ألا نزيد الجهود المستخدمة لتحديد العطل عن جهد التشغيل.

وسيتم فى هذا الفصل التعرض للأنواع المختلفة للأعطال وأسباب حدوثها وكيفية علاجها وطرق اكتشافها.

27.1 الأسباب الأساسية لانهيار الكابلات:

وفيما يلى بعض أسباب الأعطال التي تتعرض لها الكابلات (نقلا بتصرف عن تقرير لشركة توزيع مصر الوسطى) .

27.1.1 أسباب تتعلق بالكابل نفسه

- تركيب كابل بمساحة مقطع لا تتناسب مع الحمل الواقع عليه.
- عدم رباط نهايات الكابلات جيدا.
- إنقطاع موصل الكابل و هذا يحدث نتيجة لأعمال الحفر التى تتم فى مسار الكابلات المدفونة تحت الأرض لذلك يجب وضع شريط تحذيرى فوق هذا المسار لينبه القائمين بأعمال الحفر لتلافى حدوث

أى أضرار فى الكابل.

27.1.2 أسباب تتعلق بالعزل خصوصا

تنجم معظم أعطال الكابلات الكهربية عند تلف العازل أو انهياره بعد فقدانه لخواص العزل بسبب ارتفاع درجة الحرارة عن الحد المقرر ولمدة طويلة أو حدوث الصدمات الميكانيكية. ومن الجدير بالذكر أن درجة حرارة التشغيل في معظم أنواع الكابلات يجب ألا تتجاوز 58 م . ومن هذه الأسباب:

1. يحدث عطل فى الكابل إذا تعرض العازل إلى جهد أكبر من الذى يمكن أن يتحمله ، و يمكن حدوث ذلك نتيجة Lightening and Switching .
2. انهيار عازل الكابل نتيجة وجود شوائب بداخله أو فقاعات و التى تسبب تفريغ جزئى مما يؤدى إلى تدهور تدريجى فى خواص العازل و انهياره .
3. ارتفاع درجة حرارة العازل عن درجته الطبيعية مما يؤدى إلى تدهور فى خواص العازل و انهياره ، و يحدث هذا نتيجة تعرض الكابل لأحمال زائدة لفترات طويلة .
4. تدهور العازل نتيجة طول فترة الاستخدام أو نتيجة عوامل خارجية مثل الرطوبة .

27.1.3 أسباب ميكانيكية

يحدث هذا النوع من الأعطال عادة أثناء نقل بكر الكابلات وتحميلها من مكان إلى مكان فمثلا لو حدث تحطيم لبكرة وعليها الكابل ووضعت على جانبها فهذا الوضع يؤدى إلى إتلاف عزل الكابل .
ويحدث أيضا عندما يتم تشوين بكر الكابلات لفترة طويلة فى مكان ما دون رقابة وتعرضه للعبث ، وإتلافه بآلات حادة .

27.1.4 أسباب كيميائية

تتعرض الكابلات أثناء تخزينها وإستعمالها إلى عوامل كيميائية مختلفة وخاصة في الظروف الجوية كارتفاع نسبة الأملاح وغيرها ، وتتعرض أسلاك وشرائط الصلب المستخدمة كوقاية ميكانيكية للتأكسد والتآكل.
يحدث التآكل الصدأ فى الغلاف المعدنى للكابل وقد يكون سببه كهربائيا أو كيميائيا أو بسبب الاثنين معاَ .
والتآكل أو الصدأ (corrosion) نتيجة تأثيرات كيميائية يتوقف على نوع الأرض الممتد فى داخلها الكابل ، فالتربة أما تكون حمضية أو تكون قلوية وقد تحتوى على مواد عضوية يكون لها تأثير على المدى البعيد على تأكل غلاف الكابل الخارجى وكذلك التسليح و عزل الكابل مما يؤدى إلى انهياره .

أما عن التآكل الصدأ نتيجة عوامل كهربائية فهو يتوقف على مكان الكابل بالنسبة لحركة النقل والمواصلات الكهربية مثل الترام والمترو حيث أن تيار التشغيل يعود إلى مصدره عن طريق القضبان الحديدية الممتدة فى الأرض وفى هذه الحالات تتولد تيارات شاردة تأخذ طريقها إلى الغلاف المعدنى للكابلات أو المواسير اللحامية للكابل لأنها تجد مساراً سهلا للمرور فيها بدلا من طريق باطن الأرض فى طريق عودتها للمصدر الأصلى للتيار .

وتسير هذه التيارات فى الموصلات وتخرج منها نحو مصدر التيار ونتيجة لمرور التيار فى الكابل وخروجه منه مع مرور الوقت يؤدى ذلك إلى عملية الاستقطاب التى تسبب تأكل الغلاف المعدنى و انهياره ولعلاج ذلك فإنه يلزم توصيل الغلاف المعدنى للكابل بأرضى محطة الترام أو المترو لتجنب هذه التيارات الشاردة وتأثيراتها .

27.1.5 أسباب تتعلق بسوء طريقة المـــد

هذا العيب يكون سببه المباشر عدم وجود خبره كافية لدى القائم بالتنفيذ فى فرد ومد الكابلات فيجب اختبار المسار السليم للمد والفرد وأن يكون المسار بقدر المستطاع بعيدا عن كل أسباب تعرضة للتلف بعد فرده ومده مثلا أن يكون بعيد عن شبكة المياه والصرف الصحى والتليفونات ومواسير البخار والغلايات كما فى بعض المصانع وكما أنه من الواجب أن يكون عمق الحفر لرمى الكابل كافى وألا يكون قريبا من سطح الأرض مع وجود مسافة بين الكابلات التى توجد متوازية و ممتدة فى مسار واحد وكذا من الواجب أن يتم تحديد الوسط المحيط للكابل سواء رمل أو بوتامين مع الأخذ فى الاعتبار نوع التربة ومكان المد بالنسبة للضغوط الميكانيكية للمشاة والمركبات وعلى أساس ذلك يتم اختبار نوع الكابل مسلح أو بدون تسليح .
كما أنه من الواجب أيضا فى حالة وجود انحناء للكابلات أثناء الفرد يراعى أصغر قطر للأنحناء وهو يتوقف على قطر الكابل .

27.1.6 أسباب تتعلق بسوء اللحام

ويحدث هذا عادة فى الوصلات وعلب النهاية ولذلك يجب أن يكون القائم بعمل العلب ذو خبرة ومهارة ودقة فى اللحامات وإلا أصبحت نقاط اللحام ضعيفة فى الكابل ولذا يجب أن يكون اللحام جيد مع عدم ترك زوايا حادة فى اللحامات لحدوث تجمع عالي للمجال المغنطيسى عندها وكما أنه يكون هناك تركيزا عاليا للضغوط على درجة العزل وفى حالة إزالتها يجعلها متساوية على جميع مناطق العزل .

27.2 مراحل اكتشاف الأعطال

هناك خمس مراحل لاكتشاف مكان العطل بدقة فى الكابل:

المرحلة الأولى :

فى حالة الشك فى وجود عطل على الكابل من عدمه هى إجراء اختبار الجهد العالى VLF الذى سبق الإشارة إليه فى نهاية الفصل السابق . وفى هذا الاختبار يحقن كل فاز بجهد يساوى تقريبا 3 أمثال الجهد المقنن وذلك للكابلات الجديدة ، فمثلا الكابل جهد 11kV يحقن بـ 35kV (أقرب قيمة متاحة فى الجهاز لثلاث أمثال الجهد) ، أما الكابل القديم فيكتفى بضعف الجهد فقط.
ويوضع الكابل (بالطبع بعد فصله من أى دائرة) تحت هذا الجهد لمدة 15 دقيقة ، فإذا كان الكابل سليما ، فسيكون التيار المتسرب فى حدود 150 ميكروأمبير لكل كيلومتر من طول الكابل ، ويجب أن تتساوى قيمة التيار المتسرب فى الفازات الثلاثة. أما إذا زاد التيار المتسرب عن هذه القيمة فهذا يعنى وجود عطل ما ، وبالتالى ننتقل للمرحلة الثانية من اكتشاف العطل.

المرحلة الثانية:

وهذه مرحلة هامة جداً قبل البدء فى تحديد مكان العطل ، وهي معرفة قيمة مقاومة العطل بواسطة (Megger) الميجر سواء ٥٠٠٠ فولت أو ١٠٠٠ فولت ، وبناء على قيمة مقاومة العطل يتم تحديد الجهاز المناسب للاستخدام من أجل قياس مسافة هذا العطل (قياس مبدئى تمهيدا للتحديد الدقيق فى مرحلة لاحقة) كما هو موضح بالجدول أدناه:

الجهاز المستخدم	مقاومة العطل
صدى النبضة Pulse Echo	المقاومة < ١٠٠٠ Ω
القنطرة	Ω ١٠٠٠< المقاومة <2 ميجاΩ
جهاز الحرق	2ميجا Ω < المقاومة <50ميجاΩ
التيار النبضى(عطل وميضي)	Ω المقاومة > ١٠٠٠ ميجا

يستخدم جهاز الميجر لقياس قياس مقاومة العطل حيث يولد جهدا داخليا من 500 فولت ويصل حتى 10000 فولت كما فى الشكل 27-1.



Figure 27-1 قياس مقاومة العطل

وسيتم شرح الأجهزة الواردة فى الجدول السابق لاحقا.

المرحلة الثالثة :

بناء على قيمة مقاومة العطل المقاسة فى المرحلة السابقة قد نحتاج إلى عملية تفحيم (يصبح كالفحم) مكان العطل ، بمعنى أن نحرق مكان العطل بتيار عالى وجهد منخفض حتى ينهار ، وبالتالى يسهل اكتشافه ، لأن الأعطال العالية جدا فى مقاومتها لا يمكن اكتشافها إلا بتخفيض قيمة هذه المقاومة من خلال عملية التفحيم.

المرحلة الرابعة :

استخدام الجهاز المناسب لتحديد مسافة مبدئية لمكان العطل مثل الـ Pulse Echo أو Bridge إلخ بناء على النتائج السابقة. (التفاصيل فى الجزء التالى مباشرة).

المرحلة الخامسة:

تحديد المكان الدقيق للعطل عن طريق تفريغ شحنات من الجهد العالى بالكابل من جهاز يسمى بالشاكوش ، وهذه الشحنات تحدث أصواتا فى مكان العطل يمكن اكتشافها بواسطة سماعات خاصة. (التفاصيل فى الجزء بعد التالى).

27.3 أجهزة تستخدم للقياس المبدئى لمسافة العطل

توجد عدة أجهزة تستخدم لقياس مسافة العطل بنسبة خطأ معقولة لكنها لا تعطى مكان العطل بدقة متناهية وإنما فقط تقربك من مكان العطل تمهيدا لاستخدام نوع آخر من الأجهزة للتحديد الدقيق لمكان العطل.

ومن الأجهزة التى تعطى فقط مسافة العطل:

27.3.1 جهاز صدى النبضة (الرداد) (Pulse Echo)

تقوم فكرة هذه الأجهزة (شكل 27-2) على أنها ترسل الطاقة الكهربية على هيئة نبضات ثم تنعكس الطاقة عند نقط عدم الاتصال Discountinutty ومنها نقطة العطل بالطبع ، وكمية الانعكاس تعتمد على قوة الضرر كما ينرى تفصيلا من خلال الرسومات فى الجزء التالى .

وعند دفع نبضات كهربية فى بداية الكابل فإن الطاقة الكهربية لهذه النبضة تنتقل داخل الكابل بسرعة تقل قليلا عن سرعة الضوء الذى تسير به لو مرت فى وسط ليس به عزل ، والسبب فى ذلك أن التيارات خلال سيرها فى الموصل تقوم بشحن مكثفات العزل ، وبالتالى تتأثر بوجدو العزل من عدمه ، كما تتأثر بالطبع بقيمة المسافة بين النقطتين.



Figure 27-2 TDR

ملحوظة :

قد يصاحب حركة النبضات حدوث شرارة كهربية مع صوت فرقعة ،
وهذا الصوت يتم سماعه من خلال جهاز الاستقبال الذي يتمثل في السماعة التى تستخدم مع أجهزة التحديد الدقيق لمكان العطل كما سنرى لاحقا.

27.3.2 كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ انعكاس النبضات الكهربية (Time Domain Reflectometry) وهو نفس المبدأ الذي يعمل عليه الرادار .

فمن المعروف أن الموجات الكهربية (Traveling Waves) مثل الموجات أو النبضات الكهربية تنتقل على الموصلات الهوائية بسرعة الضوء بينما تنتقل على الموصلات التي بداخل الكابلات بسرعة قدرها

$$v = \frac{c}{\sqrt{\in r}}$$

حيث c هي سرعة الضوء في الفضاء

حيث $\in r$ السماحية النسبية لمادة العزل

وينعكس جزء من الموجة المتنقلة عند نقط التحول transition point ، وهي النقط التي تتغير عندها المعاوقة المميزة للكابل. وتسمى النقطة التي يقع عندها الخطأ أو العطل بنقطة تحول .ومعامل الانكسار عند هذه النقطة بصفة عامة هو :

$$\rho = \frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1}$$

حيث

Z1: المعاوقة قبل نقطة التحول

Z2: معاوقة الخرج عند نقطة التحول

وإذا اعتبرنا أن العطل في الكابل له مقاومة *Rf* كما هو مبين في الشكل 27−3 فإن المعاوقة عند نقطة التحول هي

$$Z2 = Rf * \frac{Z1}{Rf + Z1}$$

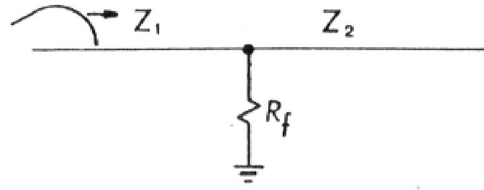


Figure 27-3

ويصبح عامل الانعكاس

$$\rho = -\frac{Z1}{2Rf + Z1}$$

من ثم ، فعند حدوث short على الموصل فإن $Z_2 = R_f = 0$ ومن ثم تكون :

$$\rho = -1$$

وعند حدوث Open Circuit فى الموصل تكون $Z_2 = \infty$ ومن ثم تكون

$$\rho = +1$$

وبناء على ذلك يمكن فهم الأشكال الموجودة فى الجزء التالى.

27.3.3 تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الـ Pulse Echo

من الواضح مما سبق أنه إذا كانت مقاومة العطل صغيرة تكون الموجة المنعكسة سالبة وقوية ، وإذا كانت المقاومة كبيرة فالموجة المنعكسة تكون موجبة وقوية .

- في حالة القصر (short circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالسالب
- في حالة القطع (open circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالموجب

وبالتالي يمكن أن نفهم أشكال الموجات التى تخرج من الجهاز فى الحالات التالية :

الحالات القصر الصريح – بدون مقاومة – ، وحالات القطع Open الصريح (شكل 27-4) :

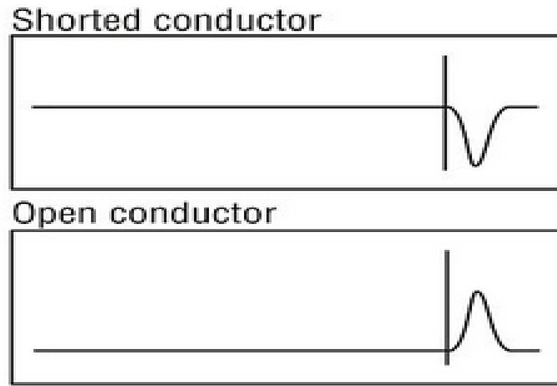


Figure 27-4

فى حالة وجود عطل قصر خلال مقاومة صغيرة يكون الشكل الناتج كما فى (شكل 27-5):

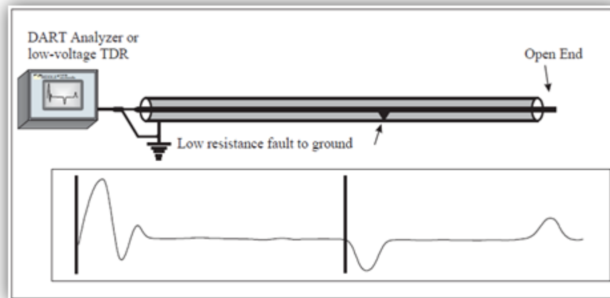


Figure 27-5

وفى حالة عدم وجود عطل يكون الشكل كما فى (شكل 27-6) ، والانعكاس هنا بسبب نهاية الكابل وليس بسبب قطع فيه.

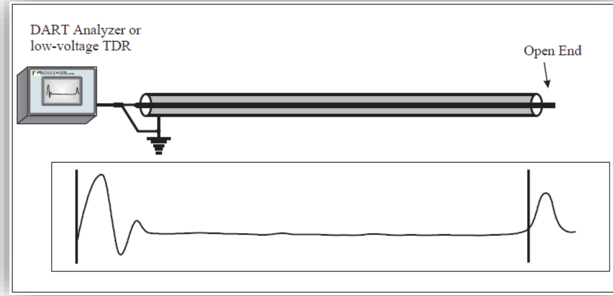


Figure 27-6

أما فى حالة وجود وصلات فيكون كما فى شكل 27-7

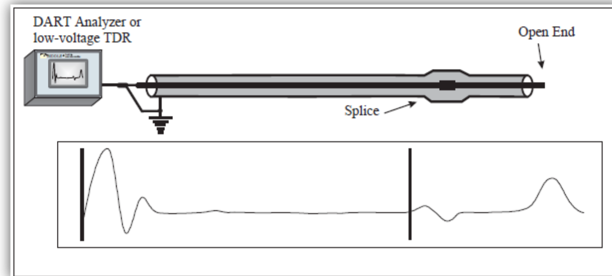


Figure 27-7

وفى حالة وجود T section يكون كما فى الشكل 27-8.

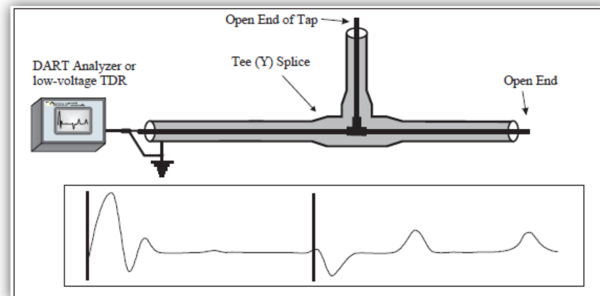


Figure 27-8

وأخيرا ، فى حالة وجود عطل مع وصلة مع T section يكون الشكل كما فى 27-9.

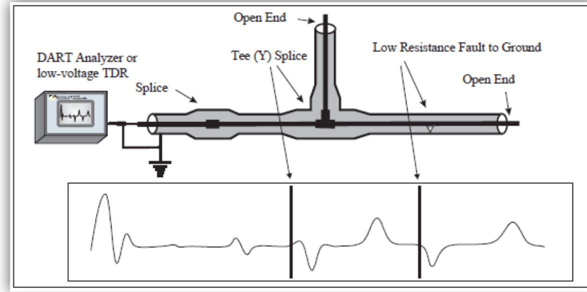


Figure 27-9

ملحوظات :

- يكون استخدام TDR فى حالة كون مقاومة العطل تساوى صفر اى وجود Short بالكابل أدى إلى عمل لحام هو الحل الوحيد ، حيث فى تلك الحالة لا يوجد فلاش أو شرارة ولا يستطيع جهاز السماعة سماع صوت الموجة المرتدة ، وبالمثل فى حالة وجود فتح بالكابل حيث أيضا لا يوجد انعكاس ولا نستطيع سماع صوت الموجة ، ولذلك يكون استخدام جهاز الرادار فى تلك الحالتين حلا وحيدا ، مع ملاحظة أن التحديد الدقيق هنا يكون مستحيلا وسيعتمد على التقريب.

- إذا لم يكن هناك عطل فسيكون على الأقل لدينا انعكاس واحد من نهاية الكابل كما فى الشكل 27-10 ، وهذا يعنى أن الجهاز يمكن استخدامه أيضا فى قياس أطوال الكابلات.

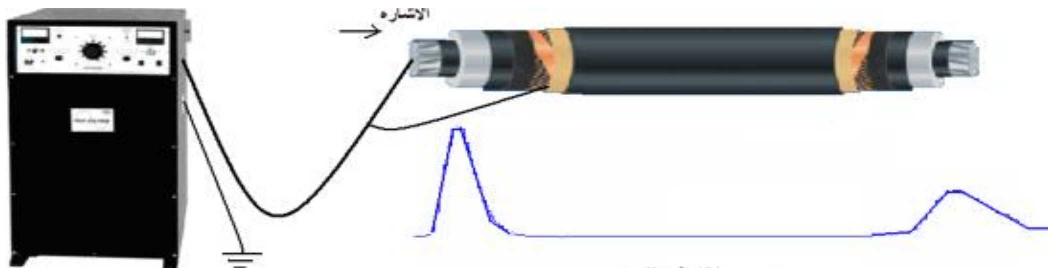


Figure 27-10

أما إذا وجد قطع فسيحدث انعكاس عند العطل وعند نهاية الكابل أيضا ولكننا بالطبع سنأخذ الأول كما فى الشكل 27-11. (ولو القطع بشكل مكتمل فسوف لايحدث انعكاس عند نهاية الكابل).

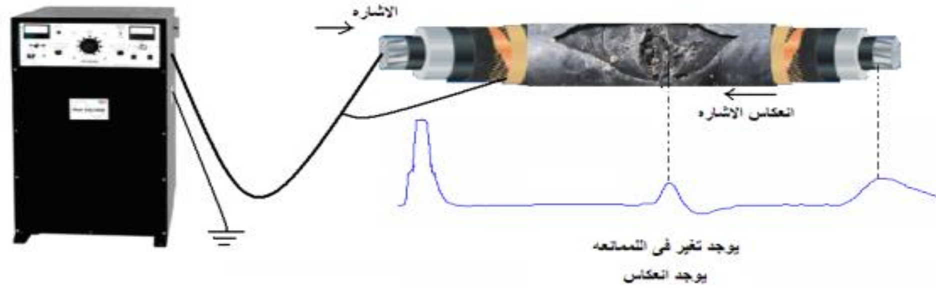


Figure 27-11

27.3.4 كيفية حساب المسافة

يقوم جهاز TDR بإرسال نبضة كهربية في الموصل الذي به عطل وقياس الزمن المنصرم من لحظة إرسال النبضة حتى وصول النبضة المعكوسة ، ويتم تحديد مكان العطل من معادلة بسيطة

$$x = \frac{1}{2} v * t$$

x: مسافة بعد نقطة العطل عند نهاية الكابل

v: سرعة انتشار النبضة على الموصل

t: الزمن المقاس

لاحظ أننا قسمنا على 2 لأن الموجة تذهب وتعود أى تقطع فعليا ضعف مسافة العطل.

و تتوقف سرعة الموجة داخل الكابل على عدة عوامل منها :

- ثابت العزل فى الكابل .
- أبعاد الكابل و جهد التشغيل .
- مقاومة موصل الكابل و التى تتوقف على نوع مادة الموصل و مساحة مقطعه .
- خواص مادة شبه الموصل المستخدمة فى الكابل .
- خواص التربة التى تحيط بالكابل.

علما بأن السرعة يمكن قياسها أولا بمعلومية كابل سليم ومعروف طوله.

27.3.5 مشاكل استخدام الــــ TDR:

من أبرز هذه المشاكل:

- أنه إذا زادت مقاومة العطل مع الأرض عن 200 أوم فإن الموجة لا تنعكس بالسالب و بالتالي لا يمكن تحديد مكان العطل بالكابل .
- أن الطول الفعلى فى مسار الكابل لا يساوى المقاس على الأرض وذلك بسبب وجود انحناءات فى مسار الكابل .
- عدم تحديد سرعة انتشار الموجة بدقة و ذلك نتيجة اختلاف مادة العزل فى أكثر من جزء فى الكابل.

ملحوظة:
تستطيع أجهزة الـ TDR الحديثة أن تحدد موقع العطل بدقة فائقة وذلك بغض النظر عن قيمة مقاومة العطل أما الأجهزة القديمة الصنع فهي لاتعطي قياسات دقيقة إذا زادت قيمة مقاومة العطل عن 200 أوم . وفى هذه الحالة يجب قياس القيمة التقريبية لمقاومة العطل بواسطة جهاز أوميتر يعمل بالبطاريات وخاص باختبار الكابلات ولا يجوز فى هذه الحالة استخدام جهاز الميجر (megger) حيث أن الجهد العالي الذي يولده هذا الجهاز قد يتسبب في حدوث تفريغ بالشرر (spark–over) مما يعطى قراءة خاطئة لمقاومة العطل.

27.3.6 استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل

تستخدم طريقة القنطرة فى تحديد نسبة مسافة العطل . فى البداية نقوم بعمل التوصيلات اللازمة كما هو موضح بالشكل 27-12 :

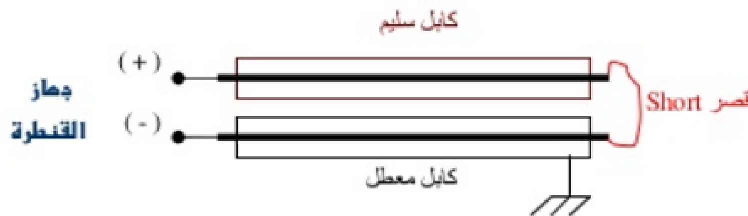


Figure 27-12

حيث يتم أخذ قراءة جهاز القنطرة ثم نقوم بحساب مسافة العطل حسب العلاقة التالية :

$$=L_f = \frac{2\times L\times Reading}{100}$$

حيث :

طول الكابل = L

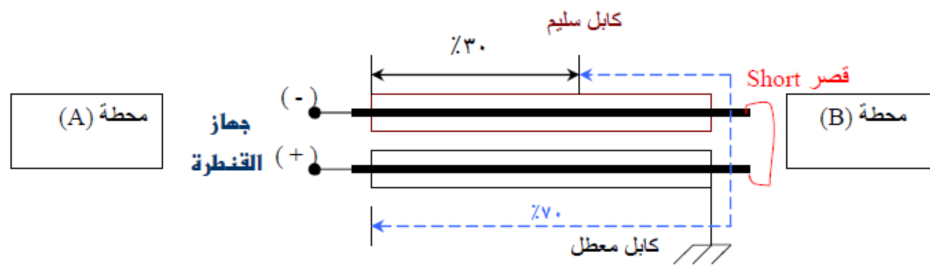
مسافة العطل = L_f

أما الـ Reading فهى نسبة مئوية من طول الكابل .

مثال :

قراءة القنطرة من المحطة (A) هي ٣٠٪ وطول الدائرة ٣٠٠٠ متر ما هي مسافة العطل؟

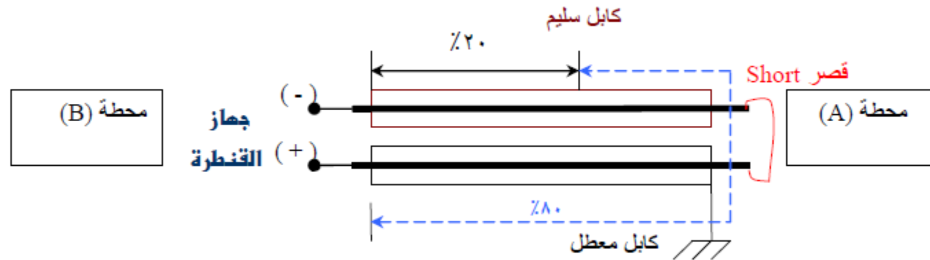
الحــل:



$$L_f = \frac{2 \times 3000 \times 30}{100} = 1800 \text{ meters}$$

مسافة العطل من المحطة (A) = ١٨٠٠متراً

وعند عكس أطراف القنطرة من نفس المحطة (A) لابد أن تكون قراءة القنطرة هي٧٠٪ أي المكملة لـــ ١٠٠٪ ، وبعد ذلك يتم التأكد من مكان العطل بذهاب الى المحطة الأخرى المحطة(B) كالآتي:



في هذه الحالة تكون قراءة القنطرة ٢٠٪ ، ولحساب مكان العطل:

$$L_f = \frac{2 \times 3000 \times 20}{100} = 1200 \text{ meters}$$

مسافة العطل من المحطة (B) = ١٢٠٠ متراً

وعند عكس الأطراف لابد أن تكون قراءة القنطرة هي 80% أي المكملة للـ 100%

27.3.7 طريقة قنطرة مورى Murray Bridge لقياس مسافة العطل

طريقة قنطرة مورى تعتبر أقدم طريقه لتحديد مكان عطل الكابل ، وهى صورة معدلة من قنطرة هويتستون Wheatstone bridge . ويجب أن تكون مقاومة العطل صغيرة لكى يسمح بمرور تيار كاف ليمر فى القنطرة وتعطى الاتزان المطلوب .

وتعطى تلك الطريقة نتائج جيده بنسبة خطأ $(\pm 1\%)$ مع سهولة فى التشغيل إلا أنه من عيوبها وعيوب أي قنطرة أنها تحتاج لموصل سليم بجوار الموصل المعطل.

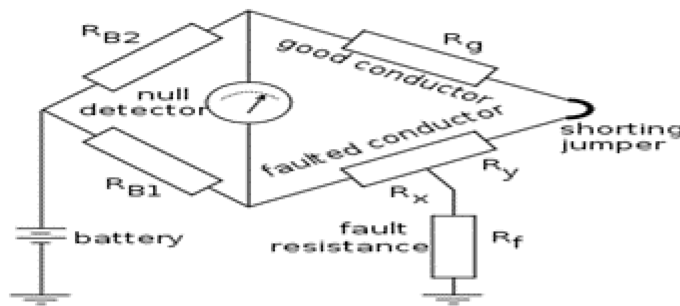


Figure 27-13

و في هذه الطريقة يتم توصيل نهاية من الكابل المعطوب بمصدر للجهد عن طريق مقاومتين و الطرف الآخر توصيله بالكابل السليم عن طريق دائرة قصر و يتم توصيل جلفانومتر بين الكابلين كما هو موضح بالرسم شكل 27-14 ، و تصل هذه القنطرة إلى الاتزان عن طريق تغيير قيم المقاومتين R_{B2} , R_{B1} حتى تكون قيمة الجلفانومتر تساوي صفر و بهذا تكون القنطرة متزنة

و يتحقق الاتزان عندما تتحقق هذه العلاقة

$$\frac{R_x}{R_g + R_y} = \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

و التي تكافئ العلاقة

$$R_x = (R_g + R_y) \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

قيمة المقاومة R_x تتناسب مع الطول L_x و لذلك يمكن حساب مسافة العطل عن طريق العلاقة

$$L_x = 2 \cdot L \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

و الــ L هو الطول الكلي للكابل الخاضع للاختبار و قيمته تتناسب مع المقاومة Rg

و بذلك نستطيع قياس مسافة العطل في حالة اتزان القنطرة .

يفترض هذا الأسلوب وجود خطأ واحد مقاومته صغيرة إذا تمت مقارنتها بمقاومة العزل للكابل السليم و أن الموصلات داخل الكابل لها مقاومة منتظمة لكل وحدة طول .

27.4 التحديد الدقيق لمكان العطل

الطرق السابقة تعطى تقديرا لمسافة العطل لكن لا تحدد بدقة مكانه . و هناك عدة طرق لهذا التحديد الدقيق منها:

27.4.1 استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator فى تحديد المكان

طريقة استخدام جهاز مولد النبضات (شكل 27–14) لتحديد أعطال الكابلات معروفة منذ عام 1940 وشهدت تطورا كبيرا مع زيادة الاعتماد على الكابلات الأرضية. ويسمى أيضا **بالشاكوش** كما سنرى



Figure 27-14 Surge Generator

والجهاز المستخدم يعرف بالمولد ذى الجهد العالي ويتكون من مصدر جهد ثابت يقوم بشحن مكثف بجهد عال ثم بعد ذلك يتم التفريغ فى الكابل عن طريق مفتاح يدوى أو أوتوماتيكي مع ضرورة تفريغ الشحنة من على الكابل بعد انتهاء الاختبار من خلال المقاومة الموجودة فى الجهاز . وتستخدم هذه الطريقة بالضرورة فى حالة كون المقاومة بين العطل والأرض كبيرة.

وإذا كانت الطاقة فى المكثف التى تم تفريغها في الكابل كافية لإحداث Partial discharge مع الأرض فإن مكان العطل سيتم تحديده بدقة حيث سيصدر عند العطل صوت يمكن رصده عن طريق سماعات خاصة بالمرور على مسار الكابل ويمكن أن تظهر اهتزازات فى التربة تلاحظ بسهولة ولذا يسمى هذا الجهاز كما ذكرنا بالشاكوش.

وقد تكون كمية الطاقة المرسلة إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل تحت الاختبار عالية وفى هذه الحالة نحتاج إلى عدة موجات دفعية لشحن الكابل أولا ثم بعد ذلك يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ويمكن حساب الطاقة المخزنة فى مكثف الجهاز عن طريق المعادلة :

$$E = V^2 C/2$$

حيث E هي الطاقة المخزنة في مكثف الجهاز و V يساوي جهد الشحن للجهاز و C هي قيمة مكثف الجهاز.

ويمكن التحكم فى هذه الطاقة أما بتغيير جهد المولد المستخدم أو بتغيير سعة مكثف الجهاز.

ويعمل الجهاز على توليد جهد على شكل Pulses ذات طاقة عالية بجهد خرج يتراوح من 15 إلى 25 كيلو فولت مما يجعل هذا النظام مناسب بدرجة كبيرة لتحديد مكان العطل فى كابلات الجهد المتوسط والمنخفض علما بأن جهد خروج فيه يصل إلى 80 كيلو فولت للجهود العالية والفائقة .

ويحظر استخدام هذه الطريقة فى حالة وجود مياه سواء من مطر أو غيره فى محيط مسار الكابل وذلك للأسباب الآتية:

- أولا : احتمالية تعرض العاملين لجهد الخطوة أو جهد اللمس نظرا لانخفاض المقاومة النوعية للتربة فى هذه الحالة مع ضرورة مراعاة احتياطات الأمان اللازمة للتعامل مع الجهود العالية.
- ثانيا: أنه في حالة اختلاط التربة بالماء يزداد تماسكها وبالتالي فإن صوت التفريغ الكهربي لا يسمع جيدا ويكون الصوت مكتوما.

وبالرغم من دقة هذه الطريقة في تحديد الأعطال إلا أن لها بعض العيوب أهمها:

- استخدام الجهد العالي في تحديد مكان العطل فى الكابل يتسبب فى حرق جزء كبير حول مكان العطل مما يتسبب فى تغيير جزء من الكابل وعمل وصلتين إن لم يكن الكابل به كوربة تسمح بعمل وصلة واحدة.
- تعرض الكابل للجهود العالية يقلل من العمر الافتراضي للكابل وبالتالي يتعرض للتلف والتغيير في زمن قصير.
- الجهد المستخدم قد يقوم بشحن الفجوات الهوائية داخل الكابل والتي لا يتم تفريغها بعد الانتهاء من تحديد العطل مما قد يتسبب فى انهيار الكابل بعد تحميله بجهد التشغيل
- و قد تكون كمية الطاقة المستهلكة إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل عالية جدا و فى هذه الحالة نحتاج إلى إرسال عدة موجات لشحن الكابل أولا ، ثم بعدها يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ، وهذه الموجات المتتابعة قد تسبب انهيار العزل فى أماكن كان العزل فيها لايزال بحالة جيدة لكنه انهار بسبب تتابع الـ Pulses. وعمليا نقنن عملية استخدام مثل هذه الجهود فنستخدمها بأقل قيم وأقل زمن (يعني لا نقوم بإطلاقها على الكابل إلا بعد الذهاب للمكان المحدد بأجهزة المسافات ، وعند سماع العطل لا نطيل فترة السماع).

مثال

عند توصيل كابل به عطل على جهاز Surge Generator ، إحسب القدرة المستهلكة فى الشرارة نتيجة العطل علما بأن سعة المكثف بالجهاز تساوى 750 ميكرو فاراد و كان جهد الاختبار يساوى 2 كيلو فولت والفترة بين كل موجة وأخرى هى 5 ثوانى.

الحل

$$E = (1/2)\ CV^2$$

$$E = (1/2)\ (750\times10^{-6})\ (2000)^2 = 1500\ \text{Joules}$$

$$P = E/t = (1500)\ /\ (5) = 300\ \text{watts}$$

27.4.2 سماعات الاستشعار

يتم تحديد مكان العطل فعليا على الطبيعة بواسطة المخططات الصحيحة للموقع حيث يتم التحديد على المخطط و معرفة المكان تقريبا على الطبيعة ثم نستخدم جهاز Surge Generator بحيث ترسل نبضات فى مسار الكابل الموضحة فى المخطط و عند المكان المحدد يتم سماع العطل بواسطة السماعة (شكل 27–15).



Figure 27-15 استخدام السماعات

ويتكون جهاز الاستقبال من قلب مغناطيسي وعليه ملف من السلك يتكون من 200 لفة من سلك النحاس المعزول ويتصل طرفا الجهاز بسماعة أذن بحيث يمكن سماع التيارات المستحثة داخل الملف بالأذن.

والفكرة هنا أنه عند مرور تيار متقطع داخل الكابل سيؤدي ذلك إلى توليد مجال مغناطيسي متغير حول الكابل وعندما يمر ملف الحث المغناطيسي فى جهاز الاستقبال على مسار اتجاه طول الكابلات يتولد في ملفه تيار

كهربي نتيجة لقطع خطوط المجال المغناطيسي له ، ويمكن سماع هذه التيارات داخل الملف بسماعات الأذن ومنها تحديد مكان الكابل.

27.4.3 استخدام طريقة الـ Arc reflector في تحديد مكان العطل

هذه الطريقة (شكل 27-16) هي مزيج يجمع بين استخدام TDR والـ (surge generator) مع استخدام فلتر (arc reflection filter) بغرض حماية جهاز الـ TDR من الجهد العالي الذى سيولده الـ (surge generator).

هذه الطريقة تستخدم حين تكون مقاومة العطل عالية جدا لدرجة أن الـ TDR لا يكتشفه ، وفى نفس الوقت سنحتاج لجهد عالي جدا إذا استخدمنا الـ Surge Gen بمفرده ، فيكون الحل هو توليد قوس كهربي بواسطة الـ Surge Gen عند نقطة الـ fault بحيث تقل مقاومة العطل إلى قيمة أصغر من 200 أوم ، وفى نفس الوقت يكون جهاز الـ TDR متصلا ، مما يمكننا من قياس انعكاس الموجات على شاشة الـ TDR ، كما سيصدر صوت ناتج عن القوس وهذا أيضا يمكننا من تحديد موقع العطل صوتيا.

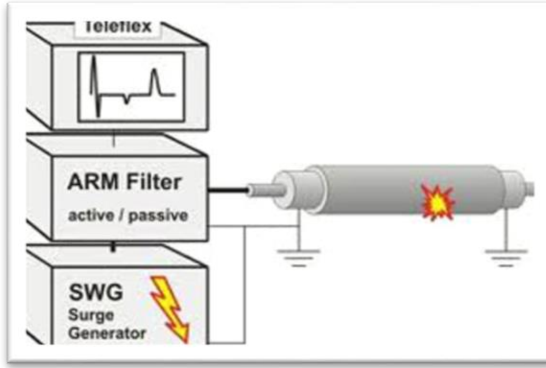


Figure 27-16 Arc Reflector

وهذه الطريقة تقلل كمية الجهد العالي الذي يتعرض له الكابل وتجنب ظهور faults بعد إعادة تشغيل الكابل .

27.4.4 تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي

يجب قبل أي تجربة للكشف على كابل به عطل معرفة مسار الكابل من الرسومات الخاصة بالمشروع وإذا لم يتيسر ذلك فلابد من استخدام جهاز تتبع مسار الكابل .

تستخدم هذه التقنية في تحديد مكان العطل المتصل بالأرض وتعتمد على حقن تيار مستمر في الكابل هذا التيار سيجد له مسارا إلي الأرض من خلال نقطة العطل ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسى الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بالشكل 27-17 ومن شدة المجال

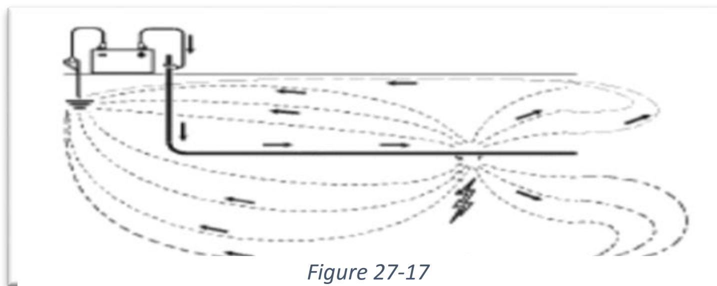


Figure 27-17

الكهرومغناطيسى يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ وأيضا خطوط المجال الخارجة من عند نقطة الخطأ تتوزع في اتجاهين متضادين.

وبالتالي ، فباستخدام أى جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه وبالتالي نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ.

علما بأن سريان التيار فى الكابل يسبب مجال مغناطيسي في الهواء والأرض ويمكن قياسه باستخدام (simple magnetic loop antenna) حيث يمكن تحليل المجال المغناطيسى إلى مكون أفقي ومكون رأسى وتستجيب دائرة الاستشعار loop antenna للمكون الأفقي من المجال المغناطيسي الذى يكون بأقصى إثارة فوق الكابل مباشرة يختلف شكل المجال المغناطيسى بجوار الـ fault لعدم مرور تيار ولذلك تقل قيمة المكون الافقى للمجال المقاس بـ antenna Loop بسرعة.

27.5 سيارات فحص الكابلات

وظيفة هذه السيارات اكتشاف الأعطال فى الكابلات بدقة متناهية وسرعة كبيرة لسهولة حركتها من مكان إلى آخر . وهى تشتمل على نفس الأجهزة السابقة لكن فى مكان واحد. و سنعرض بعض الصور للأجزاء الداخلية داخل سيارة الفحص.

تحتوي السيارة (توجد لها مجموعة صور فى الأشكال التالية) على حوالى عدة أجهزة من خلالها يمكن كشف العطل وتحديد مكانه بالضبط ومن ثم التعامل معه :



Figure 27-18 سيارة فحص الكابلات

1- جهاز الاختبار : هو نفس فكرة عمل جهاز الميجر ولكن يختلف عنه أنه يستطيع أن يتعامل مع جهود أكبر

2- جهاز الحرق + التلفلكس:

يقوم جهاز الحرق بإرسال إشارة جهد على الفازة المعطلة ، ويقوم جهاز التلفاكس برسم منحني يعبر عن الوسائط المختلفة داخل الفازة وتظهر مكان العطل على المنحني كما يتم حساب المسافة من خلال مقياس رسم ومعايرة لحساب

سرعة الإشارة ، ومن هنا فإن جهاز الحرق والتلفاكس يقومان بمعرفة بعد مسافة العطل من مكان صدور الإشارة.

3- جهاز الشاكوش:

بعد استخدام جهاز (الحرق + التلفلكس) نذهب إلى مكان العطل يقوم جهاز الحرق بإرسال إشارة جهد عالي جدا على الفازة المعطلة وعند مكان العطل يحدث شرارة أو خبطة نتيجة أن العطل يحدث فيه انهيار أكبر ومن خلال جهاز الشاكوش يتم سماع الخبطة (حيث هذا الجهاز يعتبر مكبر لصوت تلك الخبطة حيث الكابل موجود على عمق متر أو أكثر) ثم يتم الحفر في هذا المكان حتى نصل إلى الكابل ثم يتم التعامل معه

4- مبين الجهد : للأمان هناك جهاز آخر اسمه (مبين الجهد) وهو عمود طويل في نهايته جهاز(مثل مفك التست) إذا لمس أي موصل فيه تيار وليس عليه عازل يصدر الجهاز صفارة إنذار وبذلك نتأكد من أن الكابل قد تم فصله من المصدر قبل إصلاحه



Figure 27-19 الأجهزة المنوعة داخل السيارة

جهاز VLF / وجهاز المسار(Burn unit 15 KV) ومولد النبضات (Surge 3/6/12 KV) داخل السيارة



Figure 27-20 المنطقة خلف السائق بالسيارة



Figure 27-21 السيارة من الخلف وتظهر كابلات التوصيل



Figure 27-22

التى يتصل بها الكابل المعطل RMUصورة لتوصيل كابل التوصيل من العربة إلى لوحة الـــ

(الصورة منذ عدة سنوات ويظهر المؤلف إلى اليسار)

27.6 خلاصة بعض الخبرات الفنية

1- يلزم وجود أوجه phases عاطلة وأخرى سليمة لاستخدام القنطرة .

2- مقارنة صور الأوجه العاطلة بالأخرى السليمة ليسهل الوصول لمسافة العطل .

3- عند وجود عطل على الموصل conductor فهذا يعنى وجود عطل على الغلاف وعندئذ لدينا طريقتان لتحديد العطل أما باستخدام الموصل أو باستخدام الغلاف ، والعكس غير صحيح ، اى عند وجود عطل على الغلاف فليس بالضرورة أن يكون هناك عطل على الموصل ، ولذا يكون تحديد العطل عن طريق الغلاف فقط .

4- لتحديد العطل لا بد من معرفة المسافة وسماع الصوت عند العطل .

5- الأعطال منخفضة المقاومة (أقل من 100 أوم) لا يتم سماعها فيتم التحديد بطريقة المحاولة والخطأ trial and error

6- الأعطال عالية المقاومة (أكبر من 3 ميجا أوم) لا تشعر بها الأجهزة TDR ولا تعطى صورة أى انعكاس ، لذا يلزم حرق المقاومة (حرق مقنن للحفاظ على عمر الكابل وعلى قيمة مقاومة للعطل نستطيع بها سماع مكان العطل) لتقل قيمتها ونتمكن من الحصول على صورة واضحة.

7- فى أعطال الغلاف لو كان العطل بين صندوقين نستخدم القنطرة لمعرفة أيهم عنده العطل ولو العطل بين ثلاثة صناديق فإن ذلك يدل على أن العطل فى الصندوق الأوسط ويلزم أيضا التأكد من ذلك بالقنطرة للاطمئنان فقط قبل الحفر .

8- أعطال كابلات القدرة يتم تحديدها فى فترة زمنية أقل من أعطال الغلاف أو أعطال الـ Pilot Cable وذلك لأن كبلات القدرة تتحمل الجهود العالية كما أن فرصة سماع مكان العطل فى كبلات القدرة تكون كبيرة .

الباب السادس

دراسات هامة فى نظم القوى الكهربية

هذا الباب يعتبر نسبيا من أصعب أبواب الكتاب ، وفى نفس الوقت – فى رأيى الشخصي – من أهم أبواب الكتاب ، فكثير من الظواهر التى تحدث فى منظومة القوى نتعامل معها بالحسابات دون أن ندرك أحيانا أسباب نشوئها . على سبيل المثال نعلم جميعا أن هناك ارتفاع فى الجهد سيحدث بالشبكة نتيجة دخول المكثفات مثلا ، ونعلم أيضا أن الهبوط فى الجهد يمكن أن يؤدى لفصل الشبكة ، لكن السؤال هنا : كيف ولماذا؟

هذا الباب يتعرض لكثير من هذه الظواهر ولاسيما ما نسميه الهزات العابرة (Transients) التى تحدث فى منظومة القوى الكهربية بالشرح والتحليل بكثير من المنطق وقليل من المعادلات قدر الإمكان.

وسيلاحظ القارئ لهذا الكتاب أن هذا هو الباب الوحيد الذى تزيد فيه جرعة الحسابات الرياضية عن الأبواب السابقة ، وهذا هو المسلك الأشهر لفهم هذه الظواهر فى معظم المراجع ، لكننا نزيد على ذلك هنا فى هذا الكتاب استخدام المنطق العقلى والفيزيائى لفهم هذه الظواهر.

والباب مكون من ثلاثة فصول :

- فى الفصل الأول نتعرض لتفسير العديد من الظواهر العابرة Transients بالمنظومة.
- فى الفصل الثانى ندرس العوامل المؤثرة على استقرار الشبكة الكهربية Power System Stability نتيجة تعرضها لهذه الهزات وغيرها ، والجزء الأكبر فى هذا الفصل سيخصص للحديث عن استقرلر الجهد ، حيث هو المشكلة الأبرز فى أغلب الدول حاليا.
- فى الفصل الثالث ندرس ظاهرة هامة مؤثرة على أداء المنظومة وهى ظاهرة التوافقيات (Harmonics) .

28

الهزات العابرة فى نظم القوى الكهربية

TRANSIENTS IN POWER SYSTEM

28.1 مقدمة الفصل:

كلنا يستطيع تحليل ودراسة أداء أى دائرة كهربية مغذاة من DC or AC Supply طالما تحقق فى الدائرة شرطان :

1- أن تكون قيم عناصر الدائرة R,L, and C ثابتة ولا تتغير.
2- أن يكون الجهد المطبق سواء كان DC or AC خلال فترة الدراسة بعيدا عن لحظات إغلاق مفتاح الدائرة . أى أن تكون الدائرة فى حالة Steady State, SS ، حيث يمكن تطبيق قانون أوم وقوانين كيرشوف ونظريات تحليل الدوائر الكهربية Superposition, Norton, Thevenen, etc بسهولة لحساب قيم الجهد والتيار فى أى جزء من أجزاء الدائرة.

أما فى حالة كون الدائرة تمر بوضع Transient فالأمر مختلف تماما.

بداية فإن كلمة Transient أو بالعربى سنترجمها بالهزة العابرة ، يقابلها كلمة Steady State, SS أو حالة الثبات ، ورغم أنه فى كلا الحالتين فإن الدائرة الكهربية سيتحكم في أدائها عناصر الشبكة الثلاثة الرئيسية وهم Resistance, Inductance and Capacitance ، إلا أن القوانين المطبقة فى حالة الـ SS لا يصلح تطبيقها فى حالة الـ Transient لأن استجابة هذه العناصر الثلاثة للـ Transients مختلفة تماما عن استجابتها فى حالة الـ SS ، بل تختلف هذه الاستجابة حسب مدة بقاء الهزات العابرة وشكلها كذلك أثناء فترة الـ Transients.

تعرف معظم الـ Transients بأنها Disturbance تحدث أثناء الانتقال من حالة استقرار إلى حالة استقرار مختلفة وذلك فى مدة – غالبا تكون – أقل من دورة Sub cycle و تؤثر على شكل موجات الجهد والتيار. وإن كان هناك بعض الـ Transients التى قد تدوم دورات كاملة.

معظم الهزات العابرة لا تستطيع أجهزة القياس العادية أن تلحظها أو تسجلها وذلك لأن الـ Transient قد تكون لمدة 2ms مثلا وبترددات تبدأ من 0.1 Hz وتصل إلى 20kHz ، ومنها ما قد يصل إلى 50MHz فى حالة الـ GIS substations ، وهذا يعنى أن جهاز القياس يجب أن يكون له Frequency response سريع جدا حتى يمكنه رصد وتسجيل هذه الهزات بدقة وبالطبع سنحتاج إلى أجهزة خاصة جدا ومكلفة.

28.1.1 ماالمقصود بالـ Transient Analysis والـ SS- Analysis؟

ونقصد بها تحليل الظواهر العابرة والظواهر المستقرة ، فالمقصود بالـ Transient Analysis هو دراسة تصرف الدائرة مع الزمن خلال فترة الـ Transients ، حيث تظهر معادلات الجهد والتيار كدالة فى الزمن ، فعندها نقول أن هذه المعادلات هى نتاج الـ Transient Analysis . أما إذا كانت المعادلات خالية من عنصر الزمن فهذا يعنى أن الدائرة وصلت إلى حالة الثبات ولم يعد تغير الزمن يؤثر فى قيم الجهد ولا التيار (المقصود أن قيم الـ RMS لهما ثابتة) ، وبالتالي تكون المعادلات وقتها نتاج حالة الـ Steady State Analysis .

وعموما عند دراسة أداء أى دائرة كهربية رياضيا فإنه يتم دراستها من خلال معادلات تفاضلية ، ويكون الحل دائما مكون من جزءين : جزء متعلق بحالة الـ transient ، بالإضافة إلى جزء خاص متعلق بحالة الـ SS.

28.1.2 مدى الهزات العابرة

فى دراسة مقدمة من CIGRE (International Council on High Voltage Electrical Systems) and International Electro Technical Commission (IEC) تم فيها تصنيف مدى الترددات فى الهزات العابرة إلى أربع مجموعات :

1. Low–frequency oscillations, from 0.1 Hz to 3 kHz;
2. Slow–front surges, from 50/60 Hz to 20 kHz;
3. Fast–front surges, from 10 kHz to 3 MHz;
4. Very fast–front surges, from 100 kHz to 50 MHz.

كما تم تصنيف الترددات حسب سبب حدوثها على النحو التالي :

Origin --Frequency Range
Ferroresonance------------------------------------0.1 Hz to 1 kHz
Load rejection ------------------------------------0.1 Hz to 3 kHz
Fault clearing------------------------------------- 50 Hz to 3 kHz
Line switching ------------------------------------50 Hz to 20 kHz
Transient recovery voltages -------------------------50 Hz to 100 kHz
Lightning overvoltages -----------------------------10 kHz to 3 MHz
Disconnector switching in GIS ----------------------100 kHz to 50 MHz

28.1.3 لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الـ Transient ؟

حالة الـ Transient ليست كما قد يفهمها البعض على أنها حالات نادرة ، فالحقيقة أن هذه الهزات متكررة طوال اليوم ، فعلى سبيل المثال فإن الـ Transients ستنتج فى الأوقات التالية:

1- عند فصل وتشغيل أى حمل
2- عند حدوث عطل
3- عند حدوث تغيير مفاجى فى جهد الدائرة
4- عند فصل وتشغيل المكثفات والمحولات والكابلات وكذلك الـ reactors
5- عند الإصابة بالصواعق حيث سينتج عنها شكلين من أشكال الهزات :
   a. Impulse wave وهى uni-direction wave ومدتها تقاس بالميكرو ثانية
   b. Transient waves ومدتها تقاس بالمللى ثانية
6- حالات الرنين وحالات الـ ferro resonance

وقد يقول قائل : هذه الحالات متكررة لكنها طبقا للتعريف تعتبر حالات لا تبقى زمنيا إلا لأجزاء من الثانية . فلماذا الاهتمام بظاهرة ستختفى خلال جزء من الثانية؟

والإجابة أنه رغم صغر الفترة التى تحدث فيها الـ Transients إلا أنه قد يترتب على حدوثها انهيار فى الشبكة نتيجة حدوث ارتفاعات فى الجهد أو التيار خلال هذه المدة الوجيزة لا تتحملها الأجهزة . ومن هنا فكل جهاز أو

معدات كهربية معرضة لحدوث أى شكل من أشكال الـ Transient فإنه يلزم قبل توصيفها دراسة نتائج حدوث هذه الظواهر وتأثيرها عليها ، وبالتالي تكتب المواصفات وقد أخذنا فى الاعتبار أقصى ارتفاع فى الجهد ومدة بقائه وأقصى تيار وأقصى مدة له وهكذا. ومن هنا مثلا تفهم لماذا توصف وتختبر أجهزة ومعدات مثل القواطع CB والكابلات ليس فقط حسب جهد التشغيل بل أيضا حسب الجهد الدفعى max. Impulse voltage التى تتحملها.

وحتى الهزات التى لا تسبب ارتفاعات كبيرة فى الجهد فإنها تؤثر على أجهزة الوقاية مما يؤدى إلى خروج أحمال هامة بسبب هذه الهزات وبالتالي نتكبد خسائر ضخمة ، ففى مصانع الأسمنت مثلا عند حدوث هزات كهربية فإن الأحمال التى تعتمد على التردد مثل الـ (Drives) تخرج من الخدمة وتكلف المصنع خسائر كبيرة نتيجة تعطل المادة الخام وتلفها.

وأحيانا يطلق على هذه الـ Transients مصطلحات عامة من قبيل Impulse, Spike, surge, pulse وغيرها و لابد من تحديد واضح لمعنى كل لفظ من هذه الألفاظ والتى عموما يمكن أن نسميها Transients.

تأثير الـ Transient يمكن أن يسبب مشاكل لكل معدات الـ Power system بما فيها المعدات الأساسية مثل المحولات والمحركات ، وذلك رغم كونها تحتوى على Inductance عالية تستطيع أن تنشأ Damping للترددات العالية بسهولة لكنها قد تتأثر بالجهود العالية ، لكن المشكلة ستكون أكثر تعقيدا مع المعدات الإلكترونية الحساسة أو معدات التحكم عموما فى منظومة الـPower System .

28.1.4 كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الـ Transients؟

والشكل 28–1 يعطى نموذج شكلى لتوضيح ماسبق حيث يظهر جزءا من منظومة الـ power system فى الجزء الأول من الرسم ثم يظهر فى الجزء الثانى كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ SS ، وأخيرا كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ Transient.

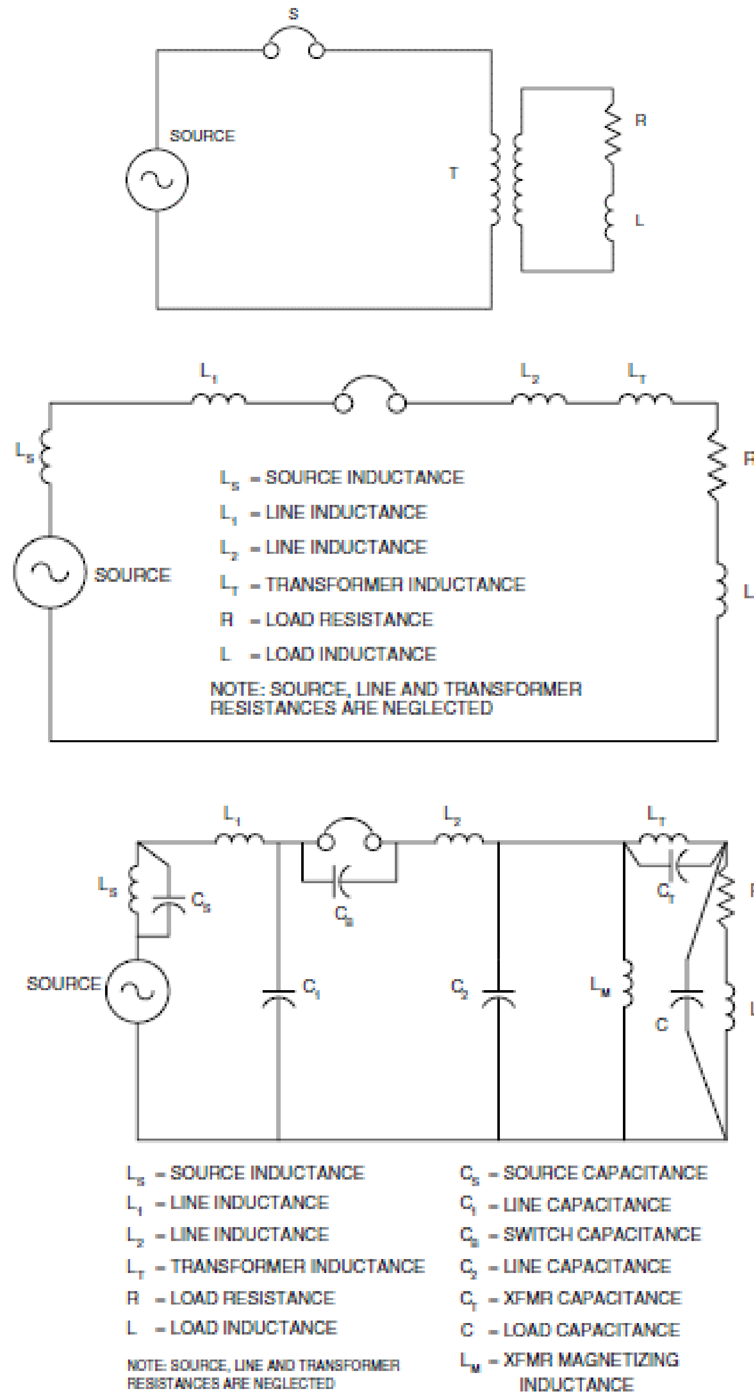


Figure 28-1 تمثيل أجزاء من منظومة القوى فى الظروف العادية وفى حالة الهزات العابرة

لاحظ كيف أن حالة الـ transient تأخذ فى الاعتبار كل المركبات مهما صغرت قيمتها بسبب ارتفاع قيمة التردد عند حالات الـ Transient بينما يتم إهمال قيم مكثفات كثيرة فى حالة الـ SS .

28.1.5 تحرير المصطلحات

الهزات العابرة تحدث سواء كانت الدائرة الكهربية مغذاة من DC Supply أو كانت مغذاة من AC Supply ، وبعض المراجع تستخدم لهذه الدراسات مصطلحات مثل مصطلح AC analysis and DC analysis .

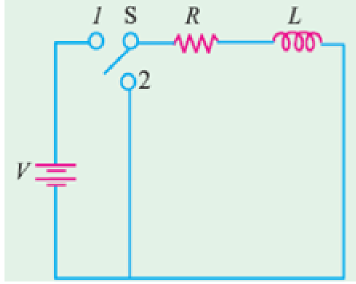


Figure 28-2

عموما يقصد بالـ DC analysis أن ندرس تصرف الدائرة إذا تم غلقها بدون وجود أى voltage source كأن تضع الـ Switch فى الوضع 2 فى الشكل 28-2 ، أو تدرس تصرفها فى بداية وضع مصدر ثابت للجهد مثل البطارية.

أما مصطلح الـ AC analysis فغالبا يقصد به دراسة Frequency response للدائرة ، بمعنى آخر ما هو تصرف الدائرة إذا مر بها تيارات ذات ترددات مختلفة ، ولذا توضع النتائج بين محورين : الأفقى هو التردد والرأسى هو الـ Magnitude سواء كان جهدا أو تيارا ومنه تعرف هل هذه الدائرة مثلا حساسة للترددات العالية أم المنخفضة أم لا تتأثر وهكذا.

ملحوظة:

قد يسأل سائل : ولماذا الاهتمام بموضوع الـ DC ونحن كافة تعاملاتنا تكون بالـ AC ؟

والإجابة أن هناك أهمية قصوى لدراسة تأثر النظام بجهد DC لأنه ورغم أن المصدر الرئيسى للتغذية هو الـ AC Supply إلا أن الـ DC Signals موجودة بكثرة ، على سبيل المثال :

1- جميع الدوائر التى تحتوى على Capacitance and Inductance يمر بها عند بدء التشغيل تيار مكون من جزءين : الأول يسمى DC Component والثانى يسمى SS Current ، وبالتالى فوجود الـ DC لا يقتصر فقط على الدوائر التى تتغذى من DC Source .

2- عند بدء تشغيل المحولات فإنها تسحب تيار الاندفاع Inrush current ، وهذا التيار مكون من جزئين DC and AC ، وبالتالى فعند دراسة تصرف أى دائرة circuit response أثناء مرور هذا التيار سنحتاج أن ندرسها بطريقة الـ Super Position حيث ندرس تأثر الدائرة بالجزء الـ DC فقط كما لو كان موجودا منفردا ، ثم ندرس تأثرها (circuit response) بالجزء الـ AC كما لو كان منفردا. ويكون الـ circuit response تجاه الـ Inrush current هو مجموع الاثنين . ما يهمنا فى هذا المثال هو التأكيد على أننا نحتاج إلى دراسة أداء الدائرة فى وجود DC source .

3- مثال آخر عند اصطدام صاعقة برقية بالمنظومة فكأننا وضعنا DC Supply على الدائرة ولا تنس أننا ندرس تأثير الـ Transient .

28.1.6 مصدر تغذية الهزات العابرة

من المهم جدا أن نعرف أن التيارات خلال فترة الـ Transient لا يكون مصدرها هو مصدر الطاقة الأساسى الذى يغذى الدائرة (بطارية مثلا أو مولد فهذه المصادر مسئولة فقط عن مرور التيار فى حالة الـ SS) ، أما مصدر تغذية تيارات الـ Transient فهى عملية تبادل الطاقة المختزنة فى الملفات والمكثفات ، بمعنى آخر لو وجدت دائرة ليس بها أى مكثفات أو ملفات فهذا يعنى بالضرورة أن الدائرة لن تتعرض لأى Transient Condition. وذلك لأن الـ L and C يمثلان العناصر القادرة على تخزين الطاقة وبالتالي يعزى إليهما المسئولية عن نشوء حالة الـ Transient ، أما المقاومة فهى العنصر المسئول عن تبديد الطاقة وليس تخزينها ولذا يعزى إليها المسئولية عن إخماد الـ Transient.

كما أن طول و قصر مدة الـ Transient ستتوقف أساسا على قيم الـ L, R and C حسب ما يسمى بالـ Time Constant كما سنرى.

28.1.7 الأنواع المختلفة من الهزات العابرة

هذا الفصل مقسم إلى ثلاثة أقسام:

<u>فى القسم الأول :</u> سنرى أن مجرد توصيل المصدر أيا كان نوعه AC or DC على دائرة بها ملفات أو مكثفات يعنى أن لدينا حالة من الهزات العابرة ، ليس بالضرورة أن تكون مصحوبة بارتفاع فى الجهد أو التيار ، وإنما يمكن أن تتسبب فقط فى تغير فى شكل موجة الجهد والتيار فى اللحظات الأولى من توصيل المصدر وبعدها تصل الدائرة إلى حالة الثبات أو مانسميها بالـ SS. وسندرس فى هذا القسم نوعين من هذه الهزات:

- الهزات العابرة نتيجة توصيل DC Supply على الدائرة
- الهزات العابرة نتيجة توصيل AC Supply على الدائرة

<u>وفى القسم الثانى</u> من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها ليس مجرد تغير فى شكل الموجة وإنما تغير كبير أيضا فى قيمتها ، وتحديدا سندرس الحالات المسببة لارتفاع فى الجهد ، وغالبا فى المراجع تدرس تحت عنوان آخر وهو حالات الـ Voltage surges ، أو تمورات الجهد وتشمل:

- الإصابة بالصواعق البرقية
- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال
- عند فصل وتشغيل المكثفات
- عند فصل وتشغيل أحمال لاسيما المحركات الكبيرة
- فصل وتوصيل المحولات

ويمكن تصنيف الحالات السابقة بطريقة أخرى حسب المدة الزمنية لبقائها ، حيث يمكن القول بأن الارتفاعات التى تحدث فى قيمة الجهد يمكن تقسيمها إلى ثلاث مجموعات هى : الارتفاع الدائم Over Voltages ، والارتفاع العارض Voltage Swell ، و الارتفاع الخاطف Impulse surges .

<u>وفى القسم الثالث</u> من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها انخفاض فى الجهد Voltage drop (عكس القسم الثانى) . وهذا الهبوط فى الجهد قد يكون دائما ومستمرا مثل حالات:

i. تيار البدء المرتفع فى المحركات
ii. الهبوط فى جهد على الكابلات نتيجة التحميل الزائد
iii. الهبوط فى الجهد بسبب المحولات

وقد يكون مؤقتا وخاطفا مثل :

iv. الهبوط فى الجهد نتيجة تيار القصر
v. الهبوط الخاطف المسبب لحدوث Voltage Sags

علما بأنه قد تحدث للجهد أيضا حالة من عدم الاستقرار Voltage Instability وهذه تدرس فى الفصل التاسع والعشرون ، حيث أنه الفصل المعنى بدراسة موضوع الـ Stability عموما.

ومما سبق يتضح أن التغيرات فى الجهد سواء بالارتفاع أو الانخفاض تصنف حسب مدة دوام هذا التغير.
والجدول 28-1 يلخص القيم القياسية لكل ظاهرة من الظواهر السابقة طبقا للمواصفة العالمية IEEE 1159:

Table 28-1

IEEE1159-EN50160 Levels

	IEEE 1159				EN50160
No.	**Categories**	**Typical Spectral Content**	**Typical Duration**	**Typical Voltage Magnitude**	
	Short Duration Variations				
	Instantaneous				
7	Sag		0.5-30 Cycles	0.1-0.9 pu	<1 sec
8	Swell		0.5-30 Cycles	1.1-1.8 pu	No
	Momentary				
9	Interruption		0.5 Cycles-3s	<0.1 pu	<1 sec
10	Sag		30 Cycles-3s	0.1-0.9 pu	No
11	Swell		30 Cycles-3s	1.1-1.4 pu	No
	Temporary				
12	Interruption		3 s-1 min	<0.1 pu	No
13	Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu	No
14	Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu	No
	Long Duration Variations				
15	Interruption, Sustained		>1 min	0.0 pu	Yes
16	Undervoltages		>1 min	0.8-0.9 pu	Yes 10 min
17	Overvoltages		>1 min	1.1-1.2 pu	Yes 10 min

وسنبدأ فيما يلى عرض الأقسام الثلاثة السابقة بالتفصيل .

القسم الأول من أنواع الهزات العابرة:

الهزات العابرة المسببة لتغير فى شكل الموجة

سنلاحظ فى هذا القسم أن الهزات العابرة فيه تسبب تغيير طفيفا فى شكل وقيمة الموجة ، على عكس الهزات التى ستدرس فى القسم الثانى والثالث والتى تحدث تغيير كبيرا فى قيمة الموجة سواء بالارتفاع كما فى القسم الثانى أو بالانخفاض كما فى القسم الثالث.

28.2 الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها مكثف ومقاومة

فى هذه الحالة (شكل 28–3) ستتزايد قيمة الجهد على المكثف من صفر حتى تصل إلى V ، بينما ستتناقص قيمة تيار شحن المكثف من قيمة عظمى هى V/R وذلك عند لحظة البدء ثم يتناقص Exponentially حتى يصل إلى الصفر حين يتم شحن المكثف تماما.

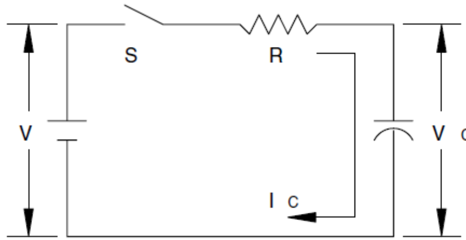


Figure 28-3

وستكون قيمة الجهد على المكثف وكذلك التيار المار خلال المكثف تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن المكثف كان غير مشحون عند البدء)

$$V_C = V(1 - e^{-t/RC})$$

$$I_C = (V/R)e^{-t/RC}$$

$$RC=\lambda$$

وكما تلاحظ من الشكل 28-4 ، فإن الجهد مكون من جزئين :

الجزء الأول هو الخاص بالـ SS

والجزء الثانى وهو الجزء الـ Exponentially ، وهو ما يمثل جزء الـ Transient .

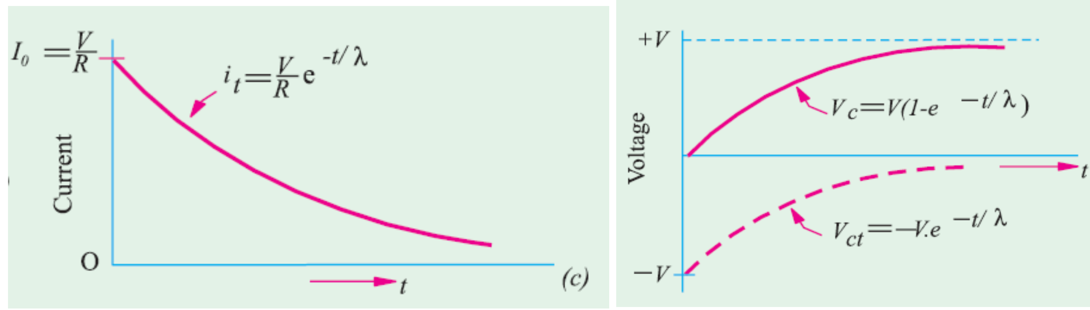


Figure 28-4

والـ Time Constant ويقاس بالثانية هو الثابت الذى يساوى RC فى معادلة الجزء الخاص بالـ Transient ، ويرمز له بالرمز λ ، ويمثل الزمن الذى تستغرقه Exponential curve ليصل إلى 36% من قيمته الأصلية (تساوى بالضبط e^{-1}). فإذا وصلت قيمة الزمن (t) إلى ضعف الـ Time Constant فستصل قيمة التيار إلى 13% (e^{-2}) بينما ستكون القيمة بعد مرور خمسة أمثال الـ TC مثلا قد تلاشت تقريبا كما فى حالة تيار شحن المكثف المرسوم هنا. وهو ما حدث أيضا مع الجزء الخاص بالـ Transient فى إشارة الجهد حيث تلاشت مع الوقت ولم يتبق سوى الجزء الخاص بالـ SS ويساوى V.

28.2.1 مفهوم الـ Time Constant, TC

يعتبر الـ TC مقياسا لمدى سرعة استرجاع النظام لعافيته بعد تأثره بهزة معينة . فكلما زادت قيمة المكثف أو المقاومة كلما كانت النظام بطيئا فى استجابته كما فى الشكل 28-5.

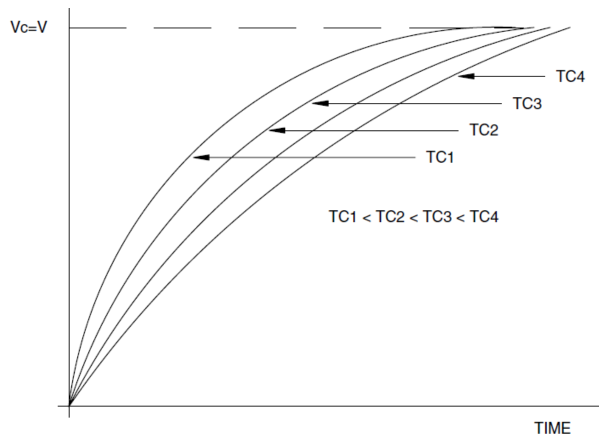


Figure 28-5 Different Time constsnt

28.3 الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة

فى هذه الحالة (شكل 28-6) ستكون قيمة تيار الملف والجهد عليه تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن التيار بالملف كان صفر عند البدء) ويكون شكل الجهد والتيار

$$V_L = Ve^{-tR/L}$$

$$I_L = (V/R)(1 - e^{-tR/L})$$

$$L/R=\lambda$$

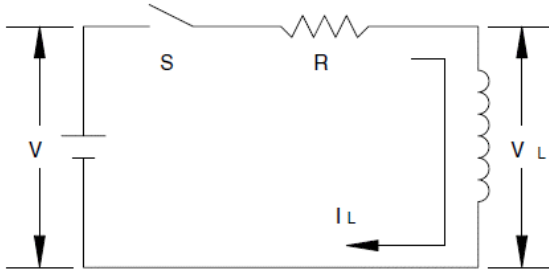


Figure 28-6

لاحظ هنا أن قيمة الـ Time Constant فى حالة الـ R-L Circuit يساوى L/R ويرمز له بالرمز λ (تذكر أنه فى حالة R-C Circuit كان يساوى RC) ، وبالتالي فكلما زادت قيمة الملف أو قلت قيمة المقاومة كلما كانت النظام بطيئا فى استجابته.

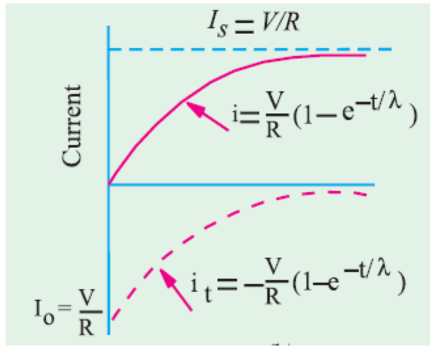


Figure 28-7

تذكر هنا لماذا نهتم بمعرفة قيمة الـ X/R ratio الخاصة بأى شبكة ، فالآن نفهم أن هذه النسبة تمثل الـ Time Constant الخاص بالدائرة والذى يعبر عن مدى سرعة وصول الشبكة لحالة الـ SS .

لاحظ أن التيار كما ذكرنا سابقا مكون من جزئين أحدهما وهو الخاص بالـ Transient سيختفى بعد مرور فترة زمنية تعادل عدد معين من مضاعفات الـ Time Constant ولذا قد تطول أو تقصر حسب قيمة الـ TC والذى تتحكم الـ R and L فى قيمته .

لاحظ أنه لو أغلقت الدائرة على الوضع رقم 2 فى الشكل 28-8 فإن التيار لن يكون هناك له source ليستمر خلال الـ SS ، ومن ثم لن يكون لدينا سوى تيار واحد فقط هو تيار الـ Transient الذى يبدأ من قيمة عظمى وينتهى للصفر.

تذكر الملحوظة الهامة أن تيار الـ Transient ليس له Source سوى الطاقة المخزنة فى الملف أو المكثف والتى سرعان ما تنتهى وينتهى معها حالة الـ Transient كما فى الشكل .

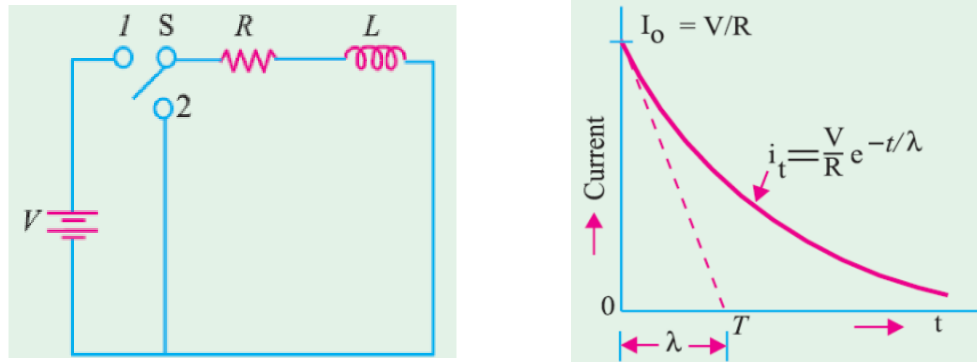


Figure 28-8

Example 22.2. *A circuit of resistance 10 Ω and inductance 0.1 H in series has a direct voltage of 200 V suddenly applied to it. Find the voltage drop across the inductance at the instant of switching on and at 0.01 second. Find also the flux-linkages at these instants.*

(Basic Electricity, Bombay Univ.)

Solution. (*i*) Switching instant

At the instant of switching on, $i = 0$, so that $iR = 0$ hence all applied voltage must drop across the inductance only. Therefore, voltage drop across inductance = **200 V**.

Since at this instant $i = 0$, there are no flux-linkages of the coil.

(*ii*) When t = 0.01 second

As time passes, current grows so that the applied voltage is partly dropped across the resistance and partly across the coil. Let us first find iR drop for which purpose, we need the value of i at $t = 0.01$ second.

Now, time period of the circuit is $\lambda = L/R = 0.1/10 = 0.01$ second. Since the given time happens to be equal to time constant,

$\therefore \quad i = (200/10) \times 0.632 = 12.64$ A; $iR = 152.64 \times 10 =$ **126.4 V**

Drop across inductance = $\sqrt{200^2 - 126.4^2} =$ **155 V**

Now, $\quad L = N\,\Phi / i \quad$ or $\quad N\Phi = Li$

$\therefore$ Flux-linkages $Li = 0.1 \times 12.64 =$ **1.264 Wb-turns.**

28.4 الهزات عند تطبيق AC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة

لو فرضنا أن لدينا AC Source له جهد قيمته تساوى $v = V_m \sin(\omega t + \varnothing)$ وتم وضعه فجأة على دائرة بها R+L ، ففى هذه الحالة سيمر كما اتفقنا تيار مكون من جزئين : SS + Transient أو

$$I = I_s + I_t$$

فأما الجزء الخاص بالـ SS فيحسب طبقا لقواعد الـ Circuits العادية ويساوى

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X_L{}^2}} = \frac{V_m}{Z}$$

وتكون صورته النهائية هى

$$i_s = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi)$$

طبقا لقواعد الـ Circuits العادية حيث Ø هى الزاوية التى يتأخر بها التيار عن الجهد وتساوى $\tan^{-1} X_L/R$

أما الزاوية Ψ فتمثل الزاوية التى تصادف أن تم غلق الدائرة عندها وقد تكون أى قيمة عشوائية لأنك لا تتحكم فى لحظة غلق الدائرة بدقة .

أما جزء الـ Transient فكما اتفقنا سابقا يكون فى حالة دوائر الـ R–L مكونا من جزء متناقص Exponentially بقيمة عظمى هى I_o . و يكون التيار الكلى هو مجموع الجزئين الثابت والمؤقت

$$i_t = I_0\, e^{-t/\lambda} \qquad \therefore\ i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) + I_0\, e^{-t/\lambda}$$

وللحصول على قيمة I_o فى دوائر الـ AC نستخدم الشروط التى تصف حالة بدء الدائرة عند t=0 فلو فرضنا أنه عند $t = 0$ كانت $I = 0$ سنحصل على قيمة I_o كما فى المعادلات التالية:

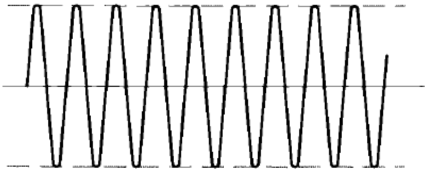
$$0 = I_m \sin(\Psi - \phi) + I_0 \qquad \therefore\ I_0 = -I_m \sin(\Psi - \phi)$$

من الواضح أن قيمة I_o تتوقف على قيمة الزاوية Ψ وهذا يعنى أن القيمة العظمى لجزء الـ Transient تتوقف على توقيت لحظة غلق الدائرة وهل كانت مثلا عند زاوية تساوى صفر أم تساوى 90 أو قيمة بينهما. وهذا هو السبب الذى يجعل من يدرس قيمة تيار العطل عند الحالات المختلفة يقوم بدراسة الأعطال عند لحظات مختلفة من الـ Sinwave ، والسبب كما ذكرنا أن قيمة تيار الـ Transient يتأثر بشدة بلحظة حدوث العطل.

وعموما فإن المعادلة العامة للتيار فى النهاية ستساوى

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) - I_m \sin(\Psi - \phi)\, e^{-t/\lambda}$$

لاحظ أنه عند $t=0$ لو كانت $\Psi = \varnothing$ فعندئذ ستكون $I_o =$ صفر بمعنى أننا لن يكون لدينا جزء Transient كما فى الجزء الأول من الشكل 28-9 ، بينما يكون الجزء الخاص بالـ Transient فى أقصاه عندما تكون $\varnothing - \pi = \Psi/2$.



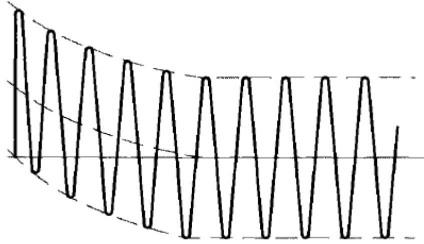


Figure 28-9 DC Component

القسم الثانى من أنواع الهزات العابرة

الهزات العابرة المسببة لارتفاع فى الجهد

الهزات العابرة ، أو الـ Transients ، المسببة لارتفاع فى الجهد تتشابه جميعها فى أنها تحدث لمدة وجيزة جدا.

ورغم أن تأثيرها يظهر فى إشارتى الجهد والتيار إلا أنه قد تم التعارف على تسميتها بالـ (Voltage Surges) ، أو الارتفاعات الحادة فى الجهد لأنها تكون غالبا أكثر وضوحا فى إشارة الجهد. وبعض المراجع العربية تستخدم مصطلح "تمورات الجهد " للتعبير عن هذه الظواهر.

28.5 ظاهرة ارتفاع الجهد

وهناك أسباب متعددة لحدوث هذه الهزات فى منظومة القوى منها :

1- ما ينشأ بسبب ظروف جوية طارئة ، والحالة الأشهر هنا هى حالة الإصابة بالصواعق البرقية.

2- وقد تحدث هذه الـ Surges نتيجة لظروف التشغيل ، حيث تتولد نبضات جهد عالى بتردد يصل إلى عدة مئات من kHz ، كما فى الحالات التالية :

أ- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)

ب- عند فصل وتشغيل المكثفات

ت- عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة

ث- فصل وتوصيل المحولات

ويمكن بصورة عامة أن نقول أن فصل وتشغيل أى معدات تحتوى على ملفات أو مكثفات ستتسبب فى حدوث Voltage Surges ، كما ذكرنا فى المقدمة لهذا الفصل.

3- وهناك سبب ثالث لحدوث هذه الـ Surges وهو تفريغ الشحنات الاستاتيكية ، فكما نعلم جميعا فمجرد أن يمشى إنسان على موكيت أو سجادة مثلا فسيتراكم على جسمه كمية الشحنات ترفع قيمة جهد الجسم إلى قيم قد تصل إلى 15 kV (ويصبح الجسم كأنه مكثف مشحون) فإذا تلامس مع جسم له جهد أقل فسيحدث تفريغ Discharge للشحنة وتمر طاقة كهربية قد تكون كافية لتدمير على الأقل بعض المعدات الإلكترونية التى قد يلمسها ، ولذا تتخذ إجراءات صارمة بالنسبة للأشخاص الذين

يتداولون هذه المعدات من ضمنها ضرورة أن يلبس سوار مؤرض فى معصمه أو تكون الأرضية من مادة Anti –static إلخ.

4- ومن الأسباب الأخرى حدوث قطع فى الموصلات أو انهيار فى العازل مما يتسبب فى حدوث ظاهرة الـ Ferroresonance مع ملاحظة أن التردد فى هذه الحالة الأخيرة لا يكون مرتفعا بل نفس تردد الشبكة.

28.5.1 طبيعة الـ Voltage surges

هى نبضات أو ارتفاعات حادة فى الجهد تحدث بمعدل سريع جدا ، وبالتبعية ستتسبب فى ارتفاعات حادة فى التيار أيضا . و هذه الـ Surge عبارة عن طاقة كهربية هائلة ذات جهد يصل فى حالة الصواعق البرقية مثلا إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذى يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، كما يصل فى الحالات الأخرى إلى عدة آلاف من الفولت .

ويتوقف مدى تأثير هذه الـ Surges على عدة عوامل منها:

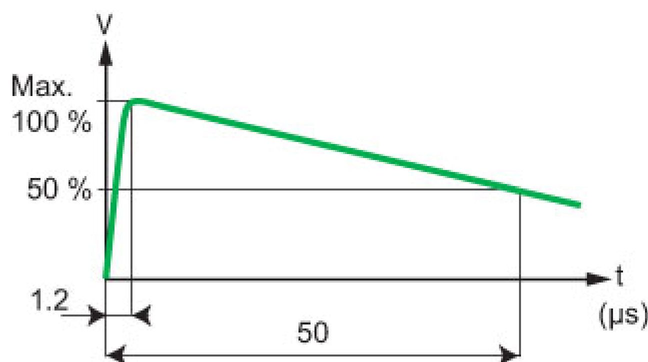


Figure 28-10 Impulse Wave

1. زمن الارتفاع Rise Time ، وهو الزمن الذى تستغرقه موجة الجهد للوصول للقيمة العظمى ، وغالبا لايتجاوز 1-2µs (1.2 فى الشكل 28-10).
2. زمن دوام الموجة ، وغالبا لا يتجاوز 50-100 µs ، وبعده يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما فى الشكل 28-10 الذى يظهر الشكل التقليدى للـ Voltage surge/ Impulse Wave (ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير 1.2 x 50 µs) . وتسمى هذه الموجة بالموجة الكاملة كما ستظهر فى جداول اختيار الجهود الدفعية Impulse voltage للمعدات لاحقا.
3. معدل الارتفاع Gradient ويقاس بالـ kV لكل ميكرو ثانية.

وهذه القيم الثلاثة تحدد مدى تأثير الـ Surge على المعدات ، وبالتالى فعوازل المعدات لابد أن تتحمل هذه الجهود المتوقعة. ومن هنا ظهرت أهمية تحديد مصطلح الـ Basic Insulation Level, BIL فى المقطع التالى.

28.5.2 ماذا نقصد بـــ Basic Impulse level (BIL)

يجب دائما توصيف الأجهزة المعرضة لمثل هذه الارتفاعات الهائلة بالجهد بحيث تكون قادرة على تحملها ، ولذا نحتاج إلى عمل اختبارات لقياس ما يعرف بالـ BIL ، وهى تمثل القيمة القصوى للـ Surge التى تتحملها المعدات الكهربية ، فالمحولات الكهربية على سبيل المثال يجب أن تتحمل عوازلها مثل هذا الارتفاع المفاجئ في الجهد نتيجة للصواعق أو أي مصدر داخلي من مصادر ارتفاع الجهد المفاجئ كعمليات الفصل والتوصيل على المحول أو المكثفات بالشبكة.

Table 28-2

BASIC INSULATION LEVEL AS PER IS (2165 – 1962)

Nominal system volt kV (rms)	Highest system volt kV (rms)	Impulse withstand volt kVp for test		One minute power frequent volt kV (rms)	
		Full insulation	Reduced insulation	Full insulation	Reduced insulation
132 kV	145	650	550	275	230
220 kV	245	1050	900	460	395
400 kV	420		1550		680
			1425		630
Reduced insulation is used where system is effectively earthed.					

فإذا كان المحول موصلاً بكابلات فى ناحيتى الجهد العالى والجهد المنخفض فإن إحتمال تعرضه لموجة Surge Voltage ناتجة عن صاعقة أو عوامل خارجية يكون ضئيلاً جداً نظرا لأن الكابلات لها قدرة أكبر من الخطوط الهوائية على تقليل شدة موجة الجهد الدفعية. أما إذا كان المحول موصلا بخط هوائى فيجب استخدام مانعة صواعق لحماية المحول ، وفى هذه الحالة يسمح بخفض قدرة عزل المحول المطلوبة . ويجب أن توضع مانعة الصواعق بحيث تكون أقرب ما يمكن من المحول.

ورغم أن إحتمال تعرض المحول المتصل بكابلات للـ Surge العالية نتيجة البرق ضئيلا إلا أن المواصفات على سبيل المثال (NEC article 280) تلزم بوضع Surge arrestor ، لكن ليس لمنع تأثير البرق بل لمواجهة تأثير الجهود الخاطفة التى يمكن أن تصل للمحول نتيجة الـ Switching مثلا.

والجدول 28-3 يعطى القيم المستخدمة فى الشبكة المصرية لتوصيف تحمل المعدات للجهود العالية فى شبكات الجهود المختلفة (راجع مصطلح الموجة الكاملة فى المقطع السابق):

توصيف المعدات حسب تحملها للجهد الدفعى Table 28-3

الجهد المقنن KVn rms	الجهد الأقصى KVm rms	جهد التحمل الدفعى بموجة كاملة KV peak	جهد التحمل بتردد المنظومة لدقيقة واحدة KV rms
١١	١٢	٧٥	٣٨
٢٢	٢٤	١٢٥	٥٠
٣٣	٣٦	١٧٠	٧٥
٦٦	٧٢,٥	٣٢٥	١٤٠
١١٠	١٢٣	٥٥٠	٢٣٠
١٣٢	١٤٥	٦٥٠	٢٧٥
٢٢٠	٢٤٥	١٠٥٠	٤٦٠
٥٠٠	٥٥٠	١٥٥٠	٦٨٠

وفيما يلى سندرس باتفصيل الحالات المختلفة للهزات العابرة المسببة للارتفاع فى الجهد وتحديدا :

1. حالة الإصابة بالصواعق البرقية.
2. عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل القواطع)
3. عند فصل وتشغيل المكثفات
4. عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة
5. حالات الـ Ferroresonance

28.6 أولا : الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية LIGHTNING

28.6.1 ما هو البرق؟

البرق يمثل تعبيرا مرئيا عن كمية هائلة من الطاقة الكهربية المحمولة على السحب. وأغلب النظريات تفسر تراكم هذه الشحنات ونشوؤها بحدوث احتكاك بين تيارات الهواء وبين الرطوبة وذرات الغبار الموجودة فى السحابة ، مما يترتب عليه ظهور كميات هائلة من الشحنات الاستاتيكية السالبة على الجزء السفلى من السحابة ، بينما تتراكم شحنات موجبة فى أعلى السحابة ، ويجذب المجال الكهربى السالب فى أسفل السحابة الشحنات الموجبة فى الأرض فتظهر شحنات موجبة على الأسطح (شكل 28–11) لاسيما على المبانى العالية المقابلة للسحابة ، وهذا يعنى أن الهواء بين السحابة والمبنى قد أصبح يمثل مكثف هوائي مشحون ، فإذا زاد فرق الجهد بين طرفى هذا "المكثف" الافتراضى عن جهد الانهيار للهواء ($3x10^6$ V/m = 30 kV/cm) فسيحدث تفريغ للشحنة على صورة شرارة بين السحابة والمبنى .

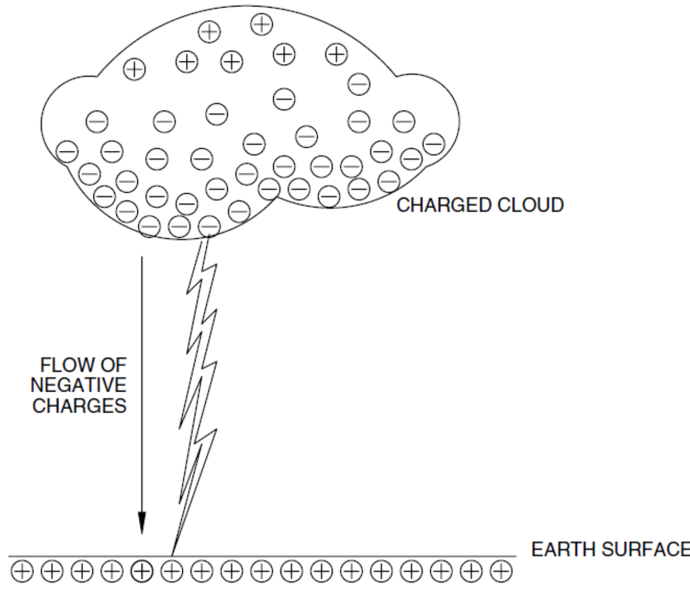


Figure 28-11 الشحنات بالسحابة

فعليا يبدأ الهواء المجاور للسحابة فى التأين بتأثير الشحنة الهائلة بالسحابة ويتكون ما يعرف بالـ Leader Streamer كما فى الشكل 28–12 ويبدأ هذا الخيط الرفيع المتأين من الهواء فى التمدد طالما السحابة لاتزال قادرة على أن تمده بالشحنات مكونا مسارا موصلا للتيار حتى يقترب من الأرض وعندما يلامس الأرض أو أى جسم فيها تنتقل الشحنات الموجبة التى كانت مقيدة على الأرض لتسلك نفس الطريق الذى صنعه الـ Leader Streamer مرتفعة للأعلى ويحدث تفريغ هائل نتيجة اتصال الشحنات الموجبة من الأرض بالسالبة فى السحابة ويحدث الشرارة العظيمة التى نسميها بالبرق.

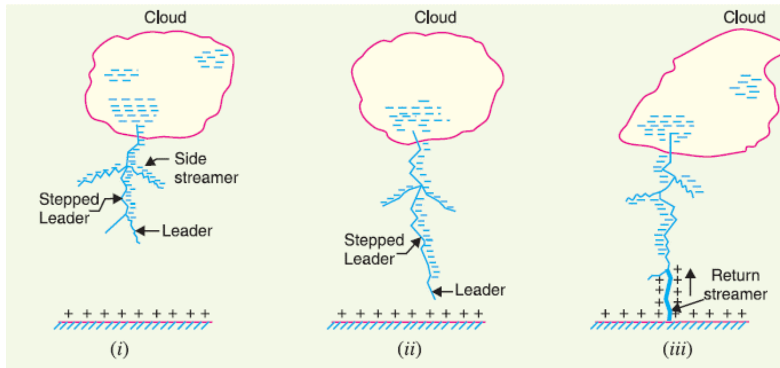


Figure 28-12 مراحل تطور البرق

و هذه الشرارة عبارة عن طاقة كهربية هائلة ذات جهد يصل إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذى يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، وأهم مايميزها هو سرعة بناء شكل موجة الجهد فيما لايتجاوز 1-2µs ، يكون الجهد قد وصل إلى قيمته القصوى ، ثم فيما لا يتجاوز 50-100 µs يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما فى الشكل الموجود فى مقدمة الفصل الذى يظهر الشكل 28-10 للـ Voltage surge/ Impulse Wave التى تتولد نتيجة الصاعقة.(ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير 1.2x50 µs) .

28.6.2 تأثر جهود الأجسام بالبرق

رغم قصر مدة التفريغ إلا أنها تكون كافية لانهيار العزل لأى من الموصلات على الأرض إذا وصلت الصاعقة إليه. الصواعق هي مصدر قوي للتغير المتسارع في الجهد الكهربي " impulse transient" و ينتج عن ذلك مرور تيار هذه الصواعق إلى الأحمال الكهربية و يؤدي إلى حدوث زيادة في الجهد كبيرة .

بصفة عامة ينشأ عن اصطدام صاعقة البرق بالخط ارتفاع لحظى حاد فى جهد نقطة الاصطدام مما ينشأ عنه تولد Travelling Wave ترحل يمينا ويسارا على الخط (شكل 28-13) حتى تصل إلى

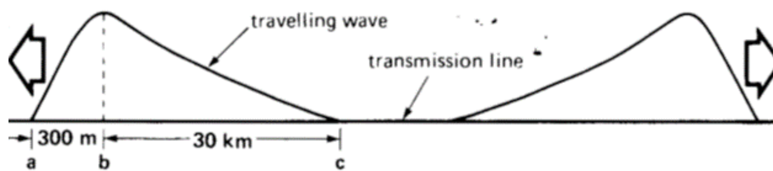


Figure 28-13 Traveling Wave

نهاية الخط من الجهتين حاملة معها شحنة طاقة هائلة ثم تنعكس هذه الموجات عند محطات نهاية الخط ، وتتكرر العملية حتى تفقد الموجة قوتها نتيجة استنفاذ طاقتها فى مقاومة الخط الأومية.

ويتميز هذا النوع من الصواعق المباشرة Direct Strokes بارتفاع حاد فى الجهد يصل إلى مليون فولت/ميكروثانية بالإضافة إلى قيمة تيار عالية تصل إلى 200 ك امبير ، فإذا لم يتم تفريغ هذه الشحنات قبل وصولها لملفات المحولات والأحمال فإنها يمكن أن تدمر كل شئ.

كما أن هذه الطاقة الهائلة الزاحفة على الخط تتسبب فى عمل قوس كهربى Electric Arc على عوازل الأبراج أثناء زحفها على الخط لاسيما على سلاسل العوازل القريبة من نقطة الاصطدام ، لكن لحسن الحظ فإن طاقة الصاعقة تضعف كلما تحركت لمسافة أطول بسبب استهلاك الطاقة خلال مقاومة الخط وبسبب حدوث تفريغات خلال الـ Arc Gaps المركبة على سلاسل العوازل (راجع الباب الثانى من هذا الكتاب).

وعندما تصل الصاعقة إلى المحول فإن المحول يقوم بدور فعال جدا فى مواجهتها ، فرغم أننا نعلم أن المحول ينقل الجهد من الجانب الابتدائى للثانوى حسب الـ Turns Ratio إلا أن هذا الكلام صحيح فقط فى مدى الترددات المنخفضة ، أما فى حالة وجود ترددات عالية فإن المحول سيمثل معاوقة عالية جدا $X_L = 2\pi f L$ بسبب التردد العالى. ومن ثم فلن تستطيع الصاعقة الانتقال للجانب الثانوى من خلال الحث المغناطيسي مثلما يحدث فى المحول مع الجهد العادى .

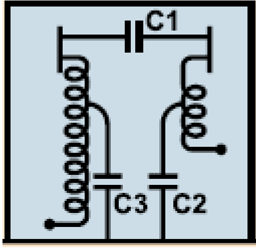


Figure 28-14

لكنها للأسف قد تستطيع الوصول للجانب الثانوى من خلال الـ coupling capacitor, C1 بين الملفات شكل 14-28 ، والتى تقدم مسارا بديلا للموجات ذات التردد العالي و هذا يؤدي إلى زيادة الجهد الكهربي في الجانب الثانوي من المحول بقيمة أكبر حتى من التى كانت المتوقعة من نسبة عدد اللفات " turns ratio" ما لم تحل هذه المشكلة بطريقة ما.

كما يوجد طرق أخرى لعبور تيار الصواعق إلى الجهة الأخرى عبر موصل الأرضي " ground conductor path" فهناك عدد من الممرات التي من الممكن أن يدخل عن طريقها تيار الصواعق إلى نظام التأريض و هو موضح في الشكل 15-28 عن طريق عدد من الخطوط المنقطة " dotted lines" .

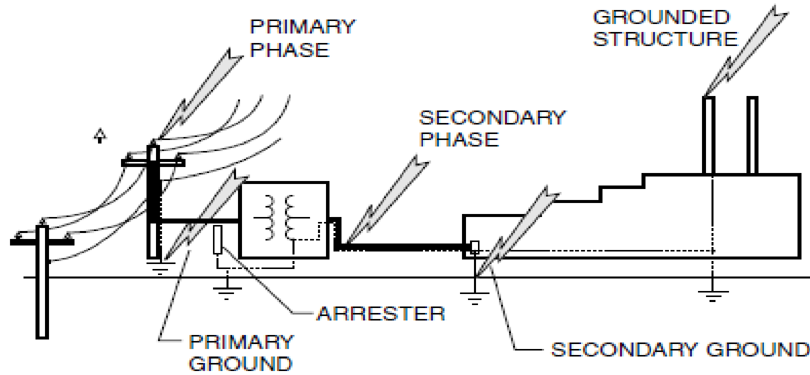


Figure 28-15 تسرب تيار الصاعقة عبر الأرضي

وبالطبع فمن أهم مشاكل الصواعق أنها ترفع الجهد إلى قيم مدمرة على كافة الأجهزة التى تقع في طريقها حتى مكان تفريق الشحنات . كما قد يرتفع الجهد على موصلات منظومة التأريض إلى عدة آلاف من الفولت ، الأمر الذى يؤدى لتلف الأجهزة الإلكترونية المؤرضة بتلك المنظومة.

28.6.3 طرق الحد من تأثير الصواعق فى شبكات الجهد العالى:

يتم حماية المعدات الكهربية من زيادة الجهد الناتج من الصواعق بتركيب مانعة صواعق Lighting arrestor ويتم حماية خطوط النقل بواسطة سلك الأرضى المركب فى أعلى أبراج خط النقل .

و بالنسبة لمانع الصواعق فهى ببساطة عبارة عن مقاومة غير خطية تتغير قيمتها بتغير الجهد الواقع عليها فتكون قيمتها كبيرة جدا عند الجهود العادية المسموح بها و عند حدوث ارتفاع مفاجىء فى الجهد تقل قيمتها وتعمل Short مما يؤدى إلى تسريب الشحنة الكهربية إلى الأرض و بذلك يتم حماية المعدات من الجهد المفاجىء (راجع تفاصيلها فى باب محطات التحويل).
ولكل مستوى جهد فى الشبكة الكهربية توجد له قيمة معينة للـ Over voltage لا يتعدها فمثلا خط نقل جهد 66 كيلوفولت تكون أقصى قيمة لزيادة الجهد هى 325 كيلوفولت طبقا للمواصفات القياسية IEC .

والجدول 28-4 يحتوى على البيانات الفنية لـ surge arreter مركب على خط 220 ك ف . ويمكن ملاحظة أهم بنود التوصيف فى مثل هذه الحالات من هذا الجدول.

Table 28-4 مواصفات مانعة الصواعق جهد 220 ك ف

Technical Datasheet	Offer number: 27051032	Attachment

Siemens H-Pos: 100; 3EP2 214-3PG43-1CZ1

System Information		
Nominal System Voltage (Un)	220	kV
Highest Voltage of Equipment (Um)	245	kV
Basic Insulation Level (BIL)	1 050	kV
Maximum altitude of installation (a.s.l.)	1000	m
Neutral system earthing	solid	
Power Frequency	50	Hz
Electrical data		
Applied Standard	IEC 60099-4	
Rated voltage (Ur)	214	kV
Maximum continuous operating voltage (Uc / MCOV)	171	kV
Nominal discharge current (In, 8/20 µs)	20	kA
Line discharge class	4	
Long duration impulse current withstand (2 ms)	1 600	A
High current impulse withstand (4/10 µs)	100	kA
Rated short circuit current (0,2 s)	65,0	kA
Maximum residual voltage at :		
20 kA 1/2 µs	574	kV
5 kA 8/20 µs	463	kV
10 kA 8/20 µs	492	kV
20 kA 8/20 µs	541	kV
40 kA 8/20 µs	591	kV
500 A 30/60 µs	399	kV
1 kA 30/60 µs	409	kV
2 kA 30/60 µs	428	kV
Temporary overvoltage for 1 s	246	kV
Temporary overvoltage for 10 s	230	kV
Energy discharge capability - thermal	10,0	kJ/kV_r
Energy discharge capability - impulse	6,50	kJ/kV_r
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet)[1]	1 650	kV
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet)[2]	1 175	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs)[1]	2 394	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs)[2]	1 800	kV
Mechanical data		
Height (H)	4 860	mm
Minimum creepage distance	10 815	mm
Number of units	3	
Weight (G)	294	kg
Color of housing	brown	
Specified long-term load SLL (F_{stat})	1020	N
Specified short-term load SSL (F_{dyn})	2570	N
Grading ring diameter (d)	1 800	mm
Distance from grading ring to top (l)	1 400	mm
Drawing number	E T HP AR 27051032.0100	

28.7 الهزات الناتجة عن فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)

عند حدوث عطل فإن الطاقة المخزنة فى الـ Power System سواء المخزنة فى الملفات أو المكثفات الخاصة بمعدات المنظومة ، هذه الطاقة تعتبر كمية هائلة ومن ثم فإن عملية قطع الدائرة تتمثل الصعوبة الأساسية فيها فى كيفية التخلص من هذه الطاقة الهائلة وكيفية تفريغها من المنظومة. ويقع العبء الأكبر فى أداء هذه المهمة على قاطع الدائرة CB حيث يتم داخله استهلاك معظم هذه الطاقة فى صورة شرارة بين أقطابه ، لكن هناك جزء آخر من هذه الطاقة يستهلك فى عملية Oscillatory Surges على خطوط النقل أو ما تسمى بالـ Travelling Waves وهى بالطبع عملية غير مرغوب فيها لأنه ينتج عنها ارتفاع مؤقت فى جهد المنظومة (TOV Temporary Overvoltage,).

والشكل 28-16 يبين نموذجا لجزء من شبكة يحدث عليها عطل وكيفية عمل دائرة مكافئة لهذه الشبكة

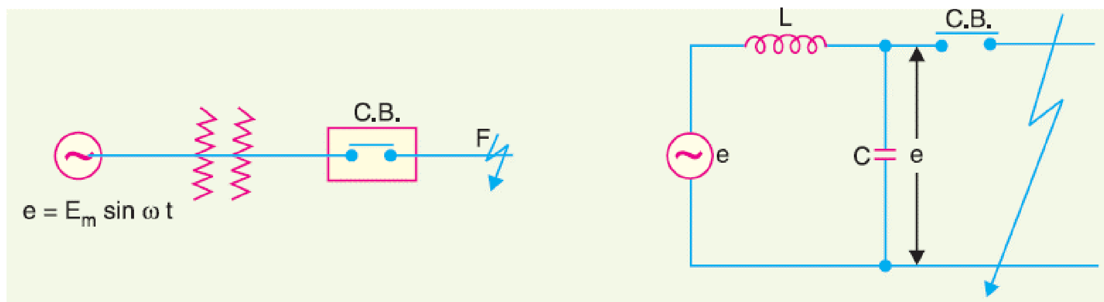


Figure 28-16

والدارس للقواطع الكهربية يجب أن يكون ملما ببعض المصطلحات مثل :

جهد الـ Arcing Voltage وهو الجهد الذى يظهر بين طرفى القاطع أثاء عملية القطع. ثم عندما يصل التيار لقيمة تساوى صفر أثناء القطع يظهر جهد جديد اسمه Restrike Voltage كما فى الشكل 28-17 وهو يمثل الـ Transient Voltage الذى يظهر بين طرفى القاطع عندما يمر التيار بنقطة الصفر .

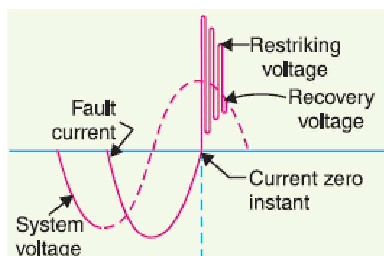


Figure 28-17

وهذه الهزة العابرة ناتجة عن إعادة توزيع وتبديل الطاقة الكهربية المخزنة فى كلا من المجال الكهربى والمغناطيسى للمصدر الكهربى والخط المتصلين كلاهما بالقاطع .

هذا الـ Oscillation يستمر لفترة وجيزة جدا كما فى الشكل لكن قيمته قد تصل إلى ضعف قيمة الجهد الأقصى للمنظومة ويجب أن يكون القاطع قادرا على تحمل هذا الجهد.

وسيحاول هذا الـ Oscillation أن يستمر أطول ما يمكن محاولا عمل انهيار للقاطع وإعادة عملية التوصيل لكن الـ Losses الموجودة بالقاطع ستضعفه حتى ينتهي ، وتظل المشكلة الوحيدة هى هذا الـ Overshoot الذى حدث فى البداية والذى قد يتسبب فى كسر العزل بين أطراف الـ CB وبالتالي تبقى احتمالية أن تفشل عملية قطع التيار.

وعلى حسب قيمة الـ Rate of Rise لهذا الـ Restrike Voltage (تسمى RRRV) ستتحدد ما إذا كانت الشرارة ستكسر العزل مرة أخرى أم لا.

فلو كان الـ Rate of Rise of Restrike Voltage, RRRV أعلى من Dielectric strength الخاص بالمادة العازلة المستخدمة بالقاطع فسينكسر العزل ويفشل القاطع فى قطع التيار.

وتتوقف قيمة الـ RRRV على عدة عوامل منها قيمة Recovery Voltage وكذلك قيمة تردد الـ Oscillation .

لاحظ أنه بعد حدوث العطل وقبل فتح الـ CB تكون الـ Capacitance غير مؤثرة لأن تيار العطل سيمر خلال الخط (الممثل بـ Inductance) ويرجع خلال الأرض فى دائرة مغلقة ولا يحتاج لأى مسار بديل. وعلى هذا فجهد المولد مطبق كله على معاوقة حثية ، ولذا فالتيار تقريبا Pure Inductive حيث أهملنا مقاومة الدائرة ، وبالتالي يتأخر التيار عن الجهد بـ 90 درجة كما فى الشكل 28-18

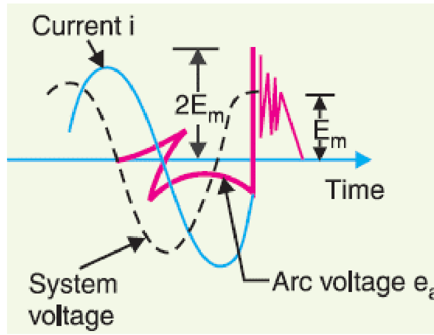


Figure 28-18

أما بعد فتح الـ CB فسيمر التيار خلال الـ Arc الداخلية فيظهر جهد بين طرفى القاطع يسمى Arc Voltage كما فى الشكل السابق ويستمر التيار المتردد فى المرور حتى ينجح الـ CB فى قطعه نهائيا .

عند هذه اللحظة (بعد فتح القاطع) يكون جهد المولد ليس أمامه سوى الـ Ind والـ Cap الخاصين بالمنظومة وبالتالي يكونا معا دائرة رنين لها تردد يساوى

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وبالتالي يظهر فجأة Restrike Voltage بالتردد السابق بين أطراف الـ CB المفتوح محدثا نوعا من الـ Oscillation فى الدائرة كما ذكرنا.

أما قيمة الـ υ , Restriking Voltage فتحسب من المعادلة :

$$v = V\left[1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)\right]$$

حيث V تمثل قيمة الجهد لحظة القطع ، وقيمة L (series ind) and C (shunt Cap) تحسب من مكان القاطع حتى نقطة العطل وبالتالى كلما صغرتا (بمعنى أن العطل قريب من القاطع) كلما كان الـ Restrike Voltage أعلى وأخطر ، وبالتالى تزيد فرص حدوث الـ Restrike. والعكس صحيح.

Example 19.3. *In a short circuit test on a circuit breaker, the following readings were obtained on single frequency transient :*

(*i*) *time to reach the peak re-striking voltage, 50 μ sec*

(*ii*) *the peak re-striking voltage, 100 kV*

Determine the average RRRV and frequency of oscillations

Solution.

$$\text{Average RRRV} = \frac{\text{Peak re-striking voltage}}{\text{Time to reach peak value}}$$

$$= \frac{100 \text{ kV}}{50 \,\mu\text{ sec}} = 2 \text{ kV}/\mu \text{ Sec} = \mathbf{2 \times 10^6 \text{ kV/sec}}$$

Natural frequency of oscillations,

$$f_n = \frac{1}{2 \times \text{Time to reach peak value}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 50 \,\mu\text{ sec}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 50 \times 10^{-6}} = \mathbf{10{,}000 \text{ Hz}}$$

Example 19.2. *A 50 Hz, 11 kV, 3-phase alternator with earthed neutral has a reactance of 5 ohms per phase and is connected to a bus-bar through a circuit breaker. The distributed capacitance upto circuit breaker between phase and neutral in 0·01 μF. Determine*

(*i*) *peak re-striking voltage across the contacts of the breaker*

(*ii*) *frequency of oscillations*

(*iii*) *the average rate of rise of re-striking voltage upto the first peak*

Solution.

Inductance per phase, $L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5}{2\pi \times 50} = 0{\cdot}0159 \text{ H}$

Capacitance per phase, $C = 0{\cdot}01 \ \mu\text{F} = 10^{-8} \text{ F}$

(*i*) Maximum value of recovery voltage (phase to neutral)

$$E_{max} = \sqrt{2} \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 8{\cdot}98 \text{ kV}$$

∴ Peak re-striking voltage $= 2\,E_{max} = 2 \times 8{\cdot}98 =$ **17·96 kV**

(*ii*) Frequency of oscillations is

$$f_n = \frac{1}{2\,\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0{\cdot}0159 \times 10^{-8}}} = \mathbf{12{,}628 \text{ Hz}}$$

(*iii*) Peak re-striking voltage occurs at a time *t* given by ;

$$t = \frac{1}{2\,f_n} = \pi\sqrt{LC} = \pi\sqrt{0{\cdot}0159 \times 10^{-8}} = 39{\cdot}6 \times 10^{-6} \text{ sec} = 39{\cdot}6 \ \mu \text{ sec}$$

∴ Average rate of rise of re-striking voltage

$$= \frac{\text{Peak re-striking voltage}}{\text{Time upto first peak}} = \frac{17{\cdot}96 \text{ kV}}{39{\cdot}6 \ \mu \text{ sec}}$$

$$= 0{\cdot}453 \text{ kV}/\mu \text{ sec} = \mathbf{453 \times 10^3 \text{ kV/sec}}$$

28.7.1 طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الـ CB

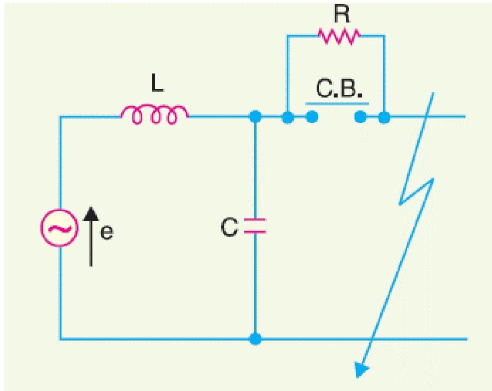


Figure 28-19

فى الجزء السابق تبين حدوث جهود عالية لاسيما فى حالات الـ Capacitive switching وهنا نعرض لواحدة من الطرق المعروفة للحد من هذا الارتفاع وذلك بإضافة مقاومة على التوازى مع القاطع كما فى الشكل 28-19.

الآن ، عند فصل القاطع وحدوث شرارة كما سبق فالجديد هنا أن جزءا من تيار الـ Arcسيمر خلال مقاومة وبالتالي يقل التيار الأصلى الذى كان يسبب تأين مسار الشرارة. وكلما زادت مقاومة مسار الـ arc كلما زادت نسبة التيار المار خلال المقاومة الخارجية حتى ينقطع تماما تيار الشرارة وتنطفئ بسرعة أكبر مما سبق.

أيضا هذه المقاومة تعمل على الحد من نمو اهتزازات Restrike Voltage ويمكن أن نثبت رياضيا أن تردد هذه الهزات العابرة قد أصبح يساوى

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4R^2C^2}}$$

فإذا كانت قيمة المقاومة تساوى $0 \cdot 5\sqrt{L/C}$

فهذا يعنى أن التردد أصبح مساويا صفر وأن الاهتزازات لن تتجاوز قيمة الـ Recover Voltage كما فى الشكل 28-20 ويقال أن الدائرة فى وضع Critically Damped أى على حافة الوصول للقيمة التى لا يحدث معها اهتزازات.

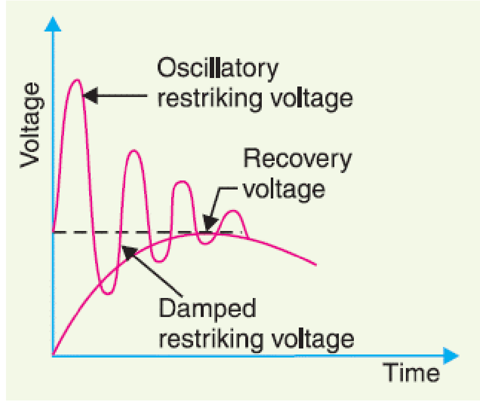


Figure 28-20

28.8 الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات CAPACITOR SWITCHING

تعتبر المكثفات عنصرا أساسيا فى منظومة القوى الكهربية ، ولها استخدامات عديدة فى مجالات التحكم ومجالات جودة القدرة Power Quality ضمن أجهزة الـ Power Conditioning . كما تستخدم المكثفات لتزويد أو مد النظام الكهربي بالقدرة التفاعلية " Reactive Power"والتي تستخدم في تصحيح معامل القدرة الكهربية " Power Factor Correction" .

وتستخدم كذلك ضمن الـ Filters المستخدمة لمنع التوافقيات مثلا (راجع فصل التوافقيات التالى) كما تستخدم ضمن منظومة الـ FACTs بأنواعها (راجع الفصل الأخير فى باب نقل القوى الكهربية) وضمن أجهزة الكترونيات القوى ولاسيما مع الـ Converters بأنواعها.

وبعض المكثفات يتم توصيلها بالشبكة و شحنها بصورة دائمة Fixed Bank وهذا النوع يمكن أن يغير الـ Time Constant للشبكة أو لجزء منها. (راجع مفهوم الـ TC فى بداية هذا الفصل).

و البعض الآخر يتم توصيلهم أو فصلهم طبقا لمستوى التحميل على الشبكة ، أو طبقا لكمية الـ Reactive Power المراد إمداد الشبكة بها ، و هذا النوع هو المنسوب إليه ظاهرة زيادة الجهد Overvoltage لأن النوع الأول لا يحدث فيه Switching وبالتالي لا يسبب مشاكل مثل النوع الثانى.

28.8.1 ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟

ويترتب على عمليات تشغيل المكثفات Capacitor Switching عدة ظواهر تتعلق كلها بالارتفاع فى الجهد أو تتسبب في حدوث Oscillatory Transient، منها على سبيل المثال:

1- ظهور Steep Front Surge فى لحظة توصيل المكثف. والسبب فى ذلك أن المكثف يبدو للمصدر كما لو كان Short Circuit فى لحظة التوصيل بسبب التردد العالى لحظة البدء ، ثم تبدأ تظهر له إخماد Damping لكن بعد أن تكون هناك موجة جهد عالية تتردد ذهابا وايابا (فتكون إشارتها موجبة مرة وسالبة مرة أخرى) بين المصدر والحمل محدثة ترددات عالية بعد عملية التوصيل كما أن هذه الـ Travelling Wave تجمع على الجهد

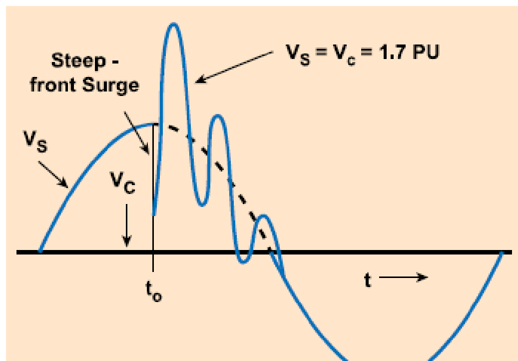


Figure 28-21

الأصلى مرة وتطرح مرة حسب الإشارة كما أسلفنا فتحدث ارتفاعات وانخفاضات فى قيمة الجهد وهذا هو السبب فى تجاوز الجهد للقيم المقننة حتى يصل إلى 170% كما فى الشكل 28-21.

2- أيضا يترتب على عملية توصيل المكثف اهتزازات عابرة نتيجة لتبادل الطاقة بين ملفات الشبكة ومكثفاتها ، فتنتج هذه العملية مدى واسعا من الترددات وهذه الترددات يمكن أن تتسبب فى حدوث ظاهرة الرنين.

3- ومن توابع عملية توصيل المكثفات أن ينتقل الجهد العالى من الجانب الابتدائى للثانوى فى المحولات وبذلك يحدث للجهد نوع من التكبير لأن هذه الموجات سيتم جمعها على الجهد الطبيعى الموجود فى الجانب الثانوى ومن ثم يرتفع الجهد عند المستهلكين ربما إلى ثلاثة أمثال القيمة الطبيعية.

ويلاحظ أن نسبة تكرار حدوث الـ overvoltage الناتج عن عملية الـ switching أكبر من نسبة تكرار حدوثه نتيجة للـ lightning ، حيث أن ظاهرة الـ lightning ظاهرة موسمية قد تحدث و قد لا تحدث ، أما الــ switching. فهى ظاهرة أو عملية دائمة الحدوث لاسيما بسبب المكثفات المستخدمة فى تحسين معامل القدرة ، نظرا لتغير قيمة الـ power factor من وقت إلى آخر ، مما يترتب عليه فصل وتوصيل المكثفات على الشبكة.

ملحوظة :

حدوث الزيادة في الجهد Overvoltages بسبب عمليات الــ Switching قد يكون أكبر من الـ Overvoltages نتيجة الصواعق في EHV & UHV System Voltages ، وقد كانت المراجع فى السابق لا تهتم سوى بالزيادة الناتجة من الصواعق ولكن مع الارتفاع فى جهد خطوط النقل وأيضا مع الأطوال الكبيرة لهذه الخطوط لاسيما الأكثر من 300 كيلوفولت حيث تصبح قيمة المكثفات بين الخطوط والأرض عالية جدا وتتسبب في حصول هذه الزيادة في الجهد عند تشغيل هذه الخطوط. ولتقليل هذا الأثر أو تخفيف قيمة الزيادة يتم تركيب Shunt Reactors على نهاية الخطوط.

28.8.2 ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟

بالنظر إلى الحالة المرسومة فى الشكل 28-22 والتى قد تمثل عملية فتح الـ CB فى وجود مكثفات تحسين معامل القدرة أو تمثل فتح خط نقل طويل له Stray Capacitance بقيمة معتبرة والخط غير محمل Unloaded . وسندرس ماذايحدث فى أسوأ الحالات . وذلك عند فتح الـ CB بينما قيمة تيار المكثف صفر وبالتالي فالجهد يكون قيمة عظمى (الجهد متأخر عن التيار بـ 90 درجة فى دوائر المكثفات كما هو معلوم)

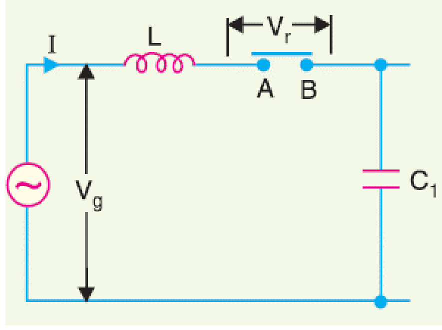


Figure 28-22

الآن ، لو فرضنا أن لحظة فتح الـ CB كانت عند نقطة 1 هذا يعنى أن جهد نقطة B (الطرف الآخر للـ CB سيكون مساويا لـ V_{gm} (max of V_g) ويظل ثابتا على ذلك طالما أن المكثف لم يفرغ شحنته. بينما يكون جهد نقطة A وهى الطرف الأول للـ CB مساوية لجهد المولد أو بمعنى آخر متغيرة القيمة حسب المنحنى الأزرق المنقط فى الشكل 28-23.

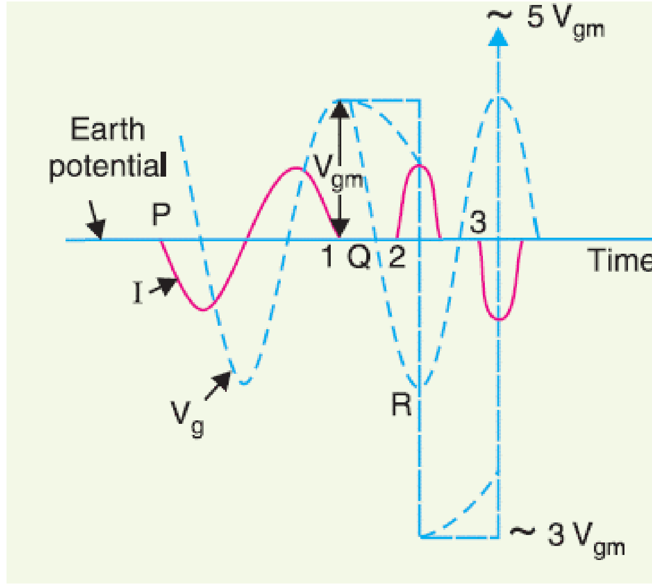


Figure 28-23

وعندما نصل إلى نقطة R على الرسم يكون فرق الجهد بين طرفى الـ CB قد وصل إلى $2V_{gm}$ وذلك كما فى المعادلة

$$(V_{gm}-(-V_{gm}))$$

وهذا الجهد قد يكون كافيا لكسر العزل بين طرفى الـ CB ويحدث له Re-Strike وتنشأ شرارة بين قطبيه ، وعندها يقوم المكثف بتفريغ شحنته خلال هذه المقاومة الصغيرة وينشأ High Frequency Transient بتردد يتوقف على قيمة L and C الموجودين بالنظام.

وكما سبق أن درسنا فإن القيمة العظمى لجهد الـ Re-strike Voltage تكون مساوية لضعف قيمة الجهد على أطراف القاطع ، وحيث أن الجهد على أطراف القاطع قد وصل إلى $2V_{gm}$ ومن ثم ستصل قيمة الـ -Re

Strike Volatge إلى $4\ V_{gm}$ عند نقطة R وقد يصل إلى $5V_{gm}$ عند الوصول إلى أول Positive Peak لجهد المصدر كما فى الشكل ، لكن وبسبب الكورونا وبسبب الفقد فى الطاقة فإنه لا يصل غالبا لهذه القيمة العالية بل يحدث نوع من الـ Decaying Oscillatory . وما يهمنا هنا هو اللحظات الأولى التى تحدثنا عنها والتى يتولد فيها Surge Oscillatory Voltage نتيجة فصل خط طويل غير محمل أو نتيجة فصل دائرة تحتوى على مكثفات لتحسين معامل القدرة , وهذه الموجة العالية ترحل ذهابا وإيابا على طول الخط مسببة ارتفاع الجهد على عوازل الخط والمعدات الأخرى ، حيث يتم تبادل الطاقة المخزنة فى المكثفات $0.5\ CV^2$ مع الطاقة فى الملفات $0.5\ LI^2$ ، ويتم هذا التبادل بتردد يساوى التردد الرنينى Resonance Frequency ، وهذا قد يؤدى كما ذكرنا لمشاكل فى عوازل المعدات وحتى مشاكل للـ Surge arrestors المركبة إن لم تكن مصممة بصورة صحيحة لاستيعاب وتبديد هذه الطاقة .

طرق الحد من مشكلة الـ Capacitor switching:

- فصل أغلب المكثفات فى حالات التحميل الضعيف لمنع ظاهرة الـover-compensation
- تحجيم مشكلة شحن المكثفات باستخدام fixed reactor و pre-insertion resistor .
- إضافة Surge arrestors

28.9 الاهتزازات الناتجة عن فصل وتشغيل بعض الأحمال

هناك أحمال تتسب فى حدوث Transient بالشبكة مثل بدء تشغيل المحركات الذى يسحب تيار بدء قد يصل لستة أمثال التيار الطبيعى وكذلك بدء تشغيل المحولات الذى يسحب Inrush currents أيضا مرتفعة جدا. وتيارات الاندفاع لا تمثل فقط مشكلة بسبب التيار المرتفع ولكنها تمثل مشكلة بسبب التوافقيات التى تظهر على تيار بدء المحولات والتى قد تتسبب فى ايجاد تردد رنينى يسبب حالة من الـ Resonance وما يترتب عليه من ارتفاع فى الجهد والتيار. وهذه التيارات قد تستمر من 10-15 cycle .

الشكل 28-24 يمثل الجهد الناتج عن حالة بدء تشغيل محول حيث يتضح أن الجهد يأخذ فى الارتفاع بعد عدة دورات cycles من التشغيل ومن الملاحظ أن هذا الجهد قد يزداد ليتعدى الـ 2pu وهذا الارتفاع فى الجهد يستمر لعدة دورات .

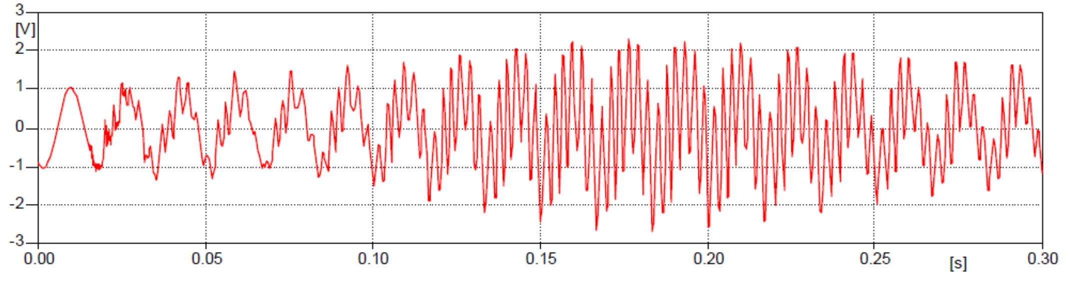


Figure 28-28-24 الجهد بعد تشغيل أحد المحولات

والشكل 28–25 يمثل حالة بدء تشغيل محرك قدرة 50 حصان ، ورغم أن الفترة الزمنية التى استغرقها النظام ليتعافى من هذه الهزة لم تتجاوز نصف دورة إلا أن التغيرات فى الجهد يمكن أن تكون كفيلة لفصل بعض الأجهزة الحساسة التى تتغذى من نفس الـ BB .

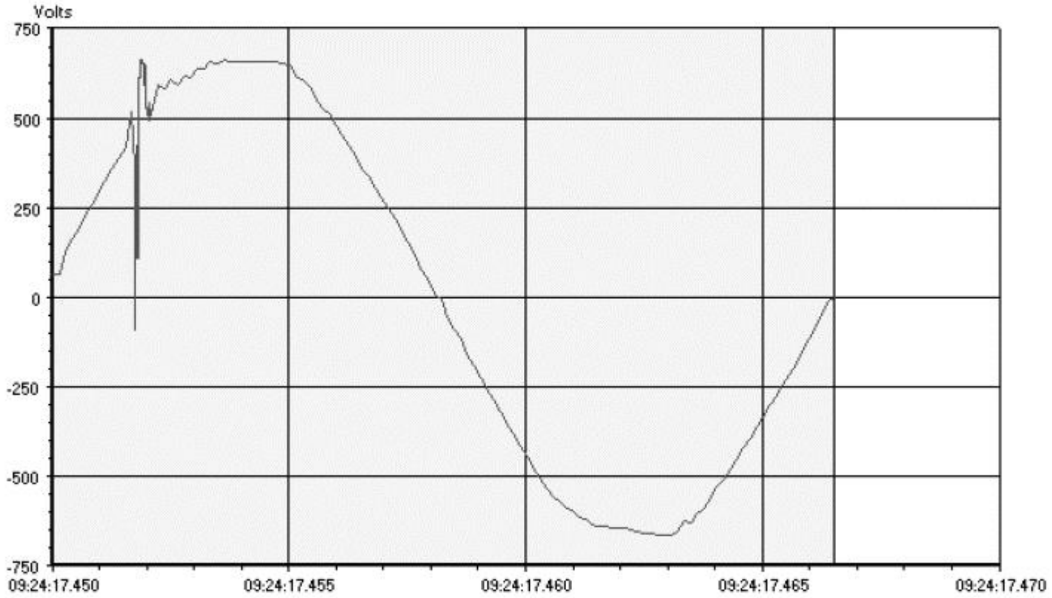


Figure 28-25 تأثير تشغيل محرك 50 حصان

وحتى الأحمال الصغيرة مثل لمبات الفلورسنت تسحب أيضا عند البدء تيارات عالية تسبب نوعا من الـ Transients بشبكة الجهد المنخفض وبالطبع فهذه التيارات سيترتب عليها حدوث Transient Voltages وهذه الأخيرة قد تؤثر على الأحمال الحساسة لتغير الجهد.

28.10 الهزات العابرة الناتجة عن ظاهرة FERRO RESONANCE

هو نوع من الرنين ولكنه لا ينتج بسبب التوافقيات مثل الرنين العادى لكنه نوع خاص من الرنين يمكن أن يقال أنه Non linear Resonnance لأنه يحدث بين (Non Linear Inductance (Iron core inductor مع مكثف المصدر المتصل به على التوالي لحظة حدوث Disturbance فى الشبكة (غالبا Open circuit condition) وبالتالي يختلف عن الرنين العادى الذى يحدث عند تساوى معاوقة ملف خطى ومكثف عند تردد محدد وفيه يتغير الجهد والتيار خطيا ، بينما يتميز الـ Ferroresonance بوجود ارتفاع فى الجهد مع تشوهات كبيرة غير خطية فى موجاتها ويمكن أن تسبب تدمير كارثى للمعدات.

وفى حالة الـ Ferroresonnace أيضا تكون التغيرات معتمدة ليس فقط على التردد بل على قيمة التغير الحاد الذى يحدث للجهد وقيمة الفيض المغناطيسى فى قلب المحولات.

أحد أشهر أمثلة هذا الرنين هو حدوث Open circuit على أحد فازات كابلات متصلة بمحول توزيع مثلا، فالآن توافرت كافة الشروط السابقة وأصبح المصدر متصلا فقط بمكثفات الكابل على التوالي مع Inductance المحول ، وقتها يصبح لدينا ارتفاع كبير فى الجهد يمكن أن يدمر العزل.

ويمكن تفسير الظاهرة على النحو التالي: بإعتبار دائرة RLC موصلة على التوالي كما بالشكل 28-26 و بإهمال قيمة المقاومة للحظة يمكن أن يمثل التيار بالتعبير التالي :

$$I = \frac{E}{j\,(X_L - |X_C|)}$$

where E = driving voltage
X_L = reactance of L
X_C = reactance of C

عندما $X_L = X_c$ سوف ينتج تيار كهربي بمقدار كبير

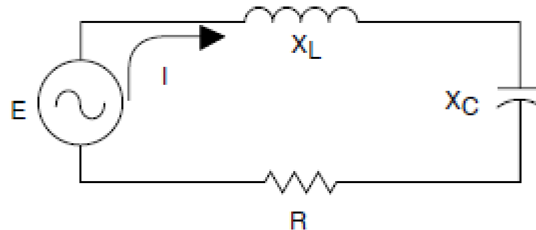
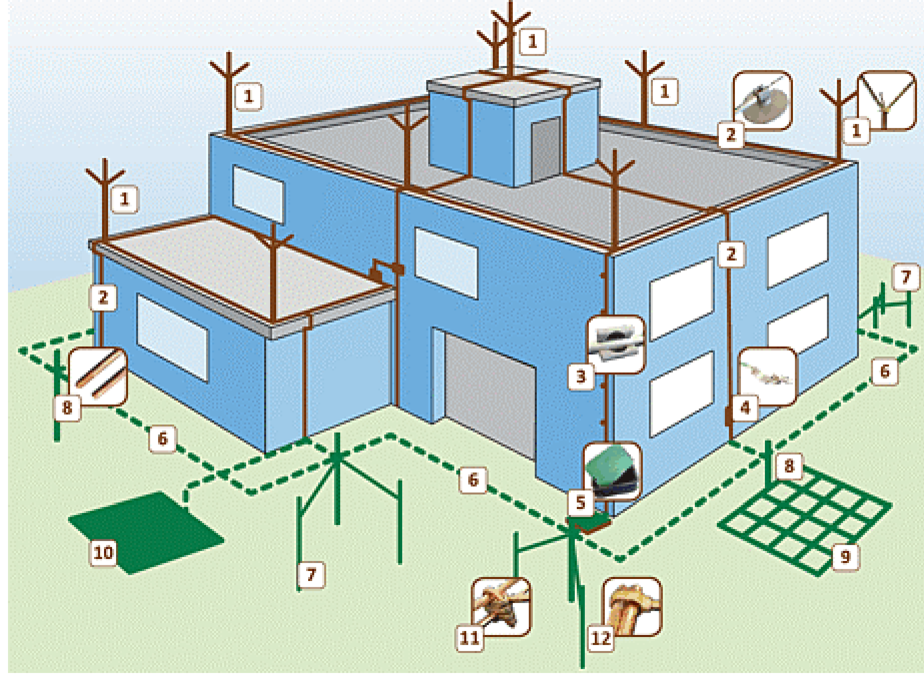


Figure 28-26

28.11وسائل الحماية من الـ VOLTAGE SURGES فى شبكات الجهد المنخفض

توجد وسائل متعددة للحماية من ارتفاعات الجهد فى شبكة الجهد المنخفض ، فمنها ما يعتبر حماية أولية مثل استخدام عصا مانعات الصواعق التى تركب فى المبانى المرتفعة ، أو استخدام فكرة Faraday cage بتحزيم المبنى بموصلات نحاسية كما فى الشكل من أجل منع اصابته بالصواعق .



ومنها أيضا حمايات توضع فى الشبكة الكهربية نفسها (مع الأجهزة أو داخل لوحات التوزيع) ، وهذه تصنف على أنها حماية ثانوية ، وهذه قد يتم توصيلها على التوالى مع الجهاز كما فى حالة الـ Filters ، وقد يتم توصيلها على التوازى كما فى حالة استخدام الـ Voltage limiters ، أو عند استخدام الـ Low Voltage Surge Arrestprs .

وهناك تقنيات متعددة لتصنيع وتنفيذ هذه الحمايات ، فأشهر طرق الحماية من الـ Voltage Suges التى تنتقل وتظهر فى شبكة الجهد المنخفض هو استخدام أحد الطرق التالية:

- تركيب Zener diode على التوازى مع المعدات المراد حمايتها حيث يتميز بسرعة استجابته للتغير فى الجهد ، ولا يسمح بتسرب تيار أثناء التشغيل الطبيعى خلاله ، لكن يعيبه أن لا يتحمل قدرة كبيرة خلاله ، لذا يستخدم فقط كأداة مساعدة.

- استخدام محولات العزل Isolation transformers ، وهذه المحولات لها Inductance عالية ، وبالتالى فالـ inductive reactance لها تزيد مع زيادة التردد ومن ثم تستخدم فى إضعاف موجة الجهد العالى وتمنع انتقالها إلى الجانب الآخر من المحول. وهذه المحولات لها Turns ratio = 1 .

لاحظ وجود ميزة أخرى لمحولات العزل وهى أنه لا يوجد مسار لرجوع التيار المار خلال هذا الشخص (شكل 28-27) سوى خلال المعاوقة الكبيرة لمحول العزل ومقاومة الأرض ، ومن ثم فالتيار خلال هذا الشخص يعتبر مهملا.

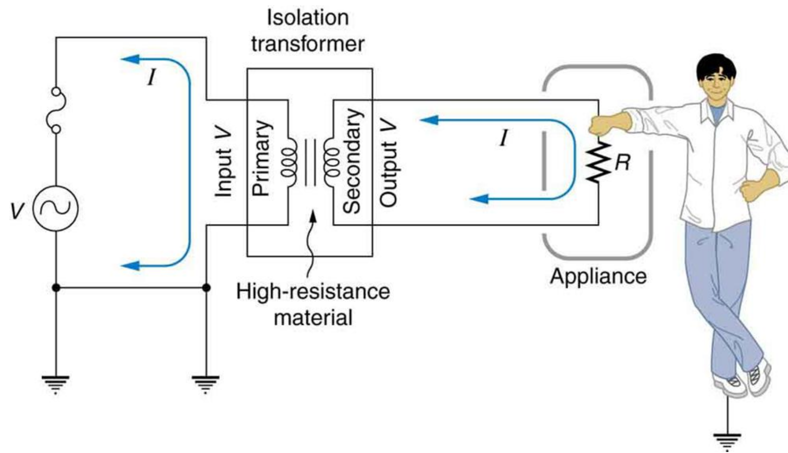


Figure 28-28-27 استخدام محولات العزل

- استخدام الفاريستور Varistor ، وهو يزيد عن ميزات Zener أنه يتحمل قدرة كهربية عالية خلاله. وهو الأكثر استخداما فى كافة مستويات الجهود بالشبكة (العالية والمتوسطة والمنخفضة).
- وأخيرا استخدام ما يعرف بالـ Power Conditioners

القسم الثالث من أنواع الهزات العابرة

الهزات العابرة المسببة لانخفاض فى الجهد

28.12 ظاهرة هبوط الجهد

انخفاض الجهد تعتبر الظاهرة الأكثر حدوثا فى الشبكات الكهربية ، كما هى الأكثر تنوعا فى مظاهرها ، فتحت هذا العنوان يندرج العديد من مظاهر هبوط الجهد منها:

1- الانخفاض المستمر للجهد: Sustained Voltage Drop/ Under Voltage
2- الانخفاض القصير (المؤقت) : Voltage Sag/Dip
3- انخفاض يصل إلى حد الانقطاع Voltage Interruption ، وهذا الانقطاع قد يكون طويلا أو قصيرا ، ويعرف بأنه حدوث تلاشى للجهد بنسبة 100% من جهد التغذية لفترة زمنية تزيد عن الثانية الواحدة ، وقد يكون هذا الانقطاع مخططا planned outage أو إجباريا forced outage وهو الانقطاع الذى يحدث فجأة دون معرفة وقت حدوثه.
4- ويمكن أن نضيف إليهم أيضا ظاهرة ارتعاش الجهد Voltage Flicker

28.12.1 الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage

هو انخفاض للجهد تتراوح قيمته بين 10% إلى 90% من القيمة المقننة للجهد الأصلى ، ويستمر لفترة طويلة تزيد عن دقيقة وقد تصل إلى ساعات متصلة (إذا قلت المدة عن دقيقة يعتبر Sag) . مع ملاحظة أنه لو وصلت قيمة الانخفاض إلى أقل من 10% من القيمة الأصلية فسيسمى انقطاع Interruption وليس انخفاض.

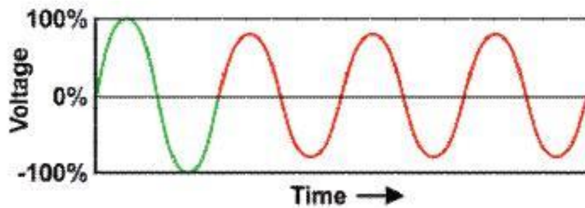


Figure 28-28 هبوط دائم فى الجهد

ودائما يجب التأكد من أن الهبوط فى الجهد Voltage Drop عند نهاية الكابل نتيجة مرور التيار لن يتعدى القيم القياسية المسموح بها هو 4% فى الظروف الطبيعية ، أو 8% فى ظروف الطوارئ (في بعض المواصفات تتراوح 3–6%). وهذا النوع لا يصنف ضمن الهزات العابرة.

أبسط أسباب انخفاض الجهد هو الانخفاض الناتج عن الـ Voltage drop ، والذى ينشأ بسبب مرور التيار خلال أسلاك التوصيل VD = I.R . ومن أسبابه :

1- زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا فى وقت الذروة والذى يؤدى إلى زيادة التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدى لانخفاض الجهد عند المستهلك .
2- عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدى أيضا إلى زيادة voltage drop.
3- وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها أو بين الكابلات والبارات حيث أنه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة العامة للكابل مما يؤدى إلى زيادة الـ voltage drop

28.12.2 الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag

هو انخفاض فى الجهد تتراوح قيمته ما بين 10% إلى 90% من قيمة الجهد أو التيار الأصلى ، لكن يختلف عن المصطلح السابق فى استمراره لفترة زمنية قصيرة ، تتراوح ما بين أقل من نصف دورة إلى دقيقة . زلذا يصنف ضمن الهزات العابرة.

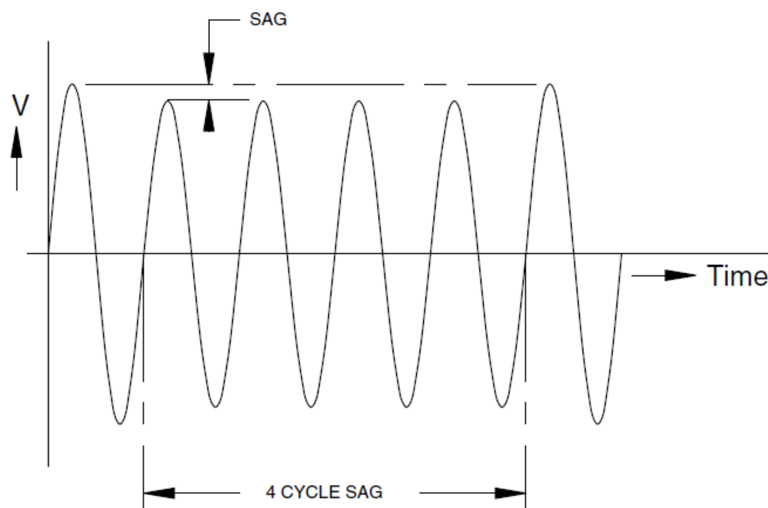


Figure 28-29 هبوط عابر فى الجهد

وأهم أسباب الانخفاض العابر للجهد هى:

1- ارتفاع قيمة الـ Voltage Drop
2- حالات القصر Short Circuit
3- بدء تشغيل المحركات الكبيرة

وفيما يلى نشرح تفاصيل هذه الأسباب:

28.12.3 انخفاض الجهد المؤقت بسبب حالات القصر Short Circuit

وتتوقف قيمة الانخفاض فى الجهد فى هذه الحالة على طريقة توصيل الحمل ، و هل هو موصل على شكل دلتا أو موصل على شكل ستار ، كما يتوقف على نوع العطل وهل هو SLG or 2LG, Phase to phase و كذلك يتوقف على قيمة مقاومة التأريض فى نقطة التعادل وهكذا.

ففي حالة التوصيل على شكل ستار وحدث عطل من النوع SLG فإنه يحدث Sag للـ Phase المعطل بينما لا تتأثر الـ two phases الأخرى تقريبا إذا كانت نقطة التعادل مؤرضة بطريقة مباشرة Directly Earthed, RE = 0 .

أما إذا كنت نقطة التعادل مؤرضة خلال مقاومة فسينخفض جهد الـ Phase المعطل كما سبق لكن سيرتفع جهد الـ Phasesالأخرى. ويمكن فهم هذه الظاهرة من الشكل 28-30:

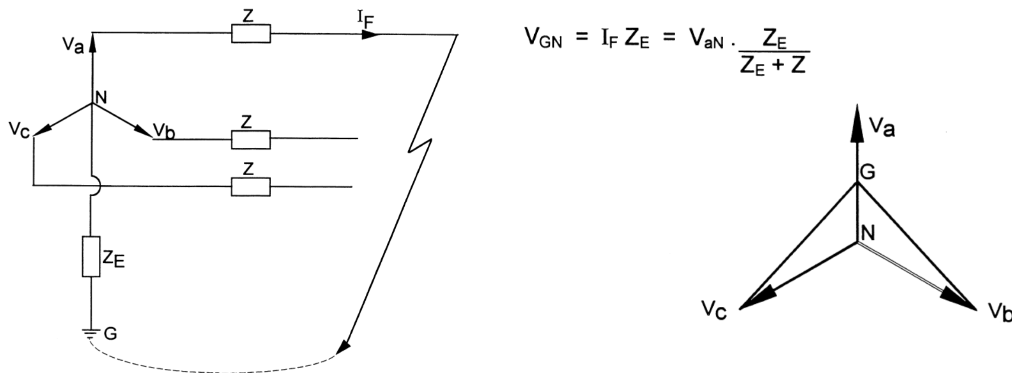


Figure 28-28-30 انخفاض الجهد على الفازة المعطلة نتيجة زحزحة نقطة التعادل

واضح أن جهد الـ N ارتفع ليصبح بقيمة تساوى VGبدلا من صفر كما كان قبل العطل ، وهذا تسبب فى انخفاض جهد الـ Va لأنه أصبح يساوى Va –Vg والطرح هنا جبرى لأنهما من نفس الـ Phase ، بينما ارتفع الجهد على الـ Two phases الآخرين لأنه أصبح Vb– VG والطرح هنا اتجاهى لأنهما من Two Different Phases .

والشكل 28-31 يظهر أنواعا أخرى من تأثر الجهود بالأعطال

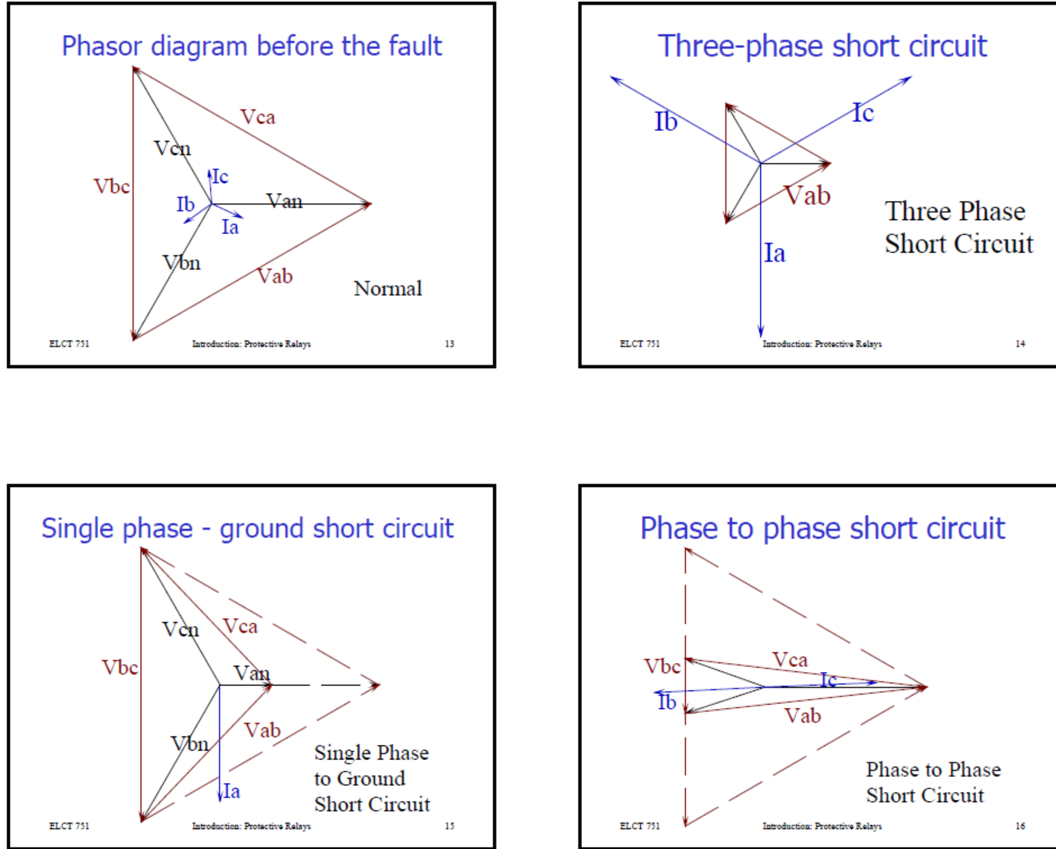


Figure 28-31

28.12.4 انخفاض الجهد المؤقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة

عند تشغيل المحرك فإنه يسحب تيارا كبيرا يكون أكبر من التيار الطبيعي بحوالي 5-6 مرات فيتسبب في حدوث voltage drop نتيجة معاوقة الخط (R + j X) ، بحيث يحدث انخفاض في الجهد عند Point of Comon Coupling, PCC (شكل 28-32) ، وبالتالي يؤثر على باقي الأحمال المشتركة في هذه النقطة. هذا الانخفاض فى الجهد قد يؤدى لإطفاء مصابيح التفريغ الغازى وقد يؤدى لعدم قدرة بقية المحركات على القيام بعملية البدء أثناء فترة انخفاض الجهد .

المشكلة أيضا أن هذا التيار هو تيار حثى بمعنى أن له معامل قدرة Power Factor منخفض جدا يصل إلى 0,3 ومن ثم تتسبب الزيادة الفجائية فى التيار المسحوب فى سحب قدرة غير فعالة عالية جدا مما يجعل الهبوط فى الجهد مضاعف. وهذا ما جعل المصممين يفضلون بدء المحرك عن طريق توصيله بإحدى وسائل البدء (Soft Starting Delta/Star switch or) التى تحد من قيمة التيار المرتفع ولا تؤثر على عزم البدء المطلوب.

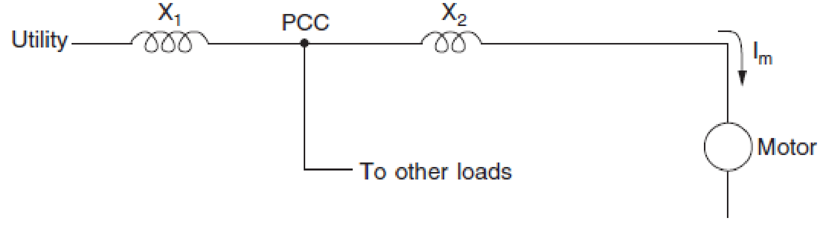


Figure 28-32

ومن الأسباب الأخرى لانخفاض الجهد:

1- الزيادة المفاجئة للأحمال أو دخول عدد من الأحمال الكبيرة فى وقت قصير

2- تشغيل ماكينات اللحام بالقوس الكهربى حيث أنها تسحب تيارا كهربيا عاليا أثناء عملية اللحام.

28.12.5 ظاهرة ارتعاش الجهد Voltage Fluctuation (flicker)

هي عبارة عن تغيرات متتالية فى الجهد (شكل 28-33) تحدث بشكل عشوائي و تكون قيمة هذا التغير بنسبة 10 % من قيمة الجهد الاصلية فتسبب ارتعاشات فى الانارة والشاشات .

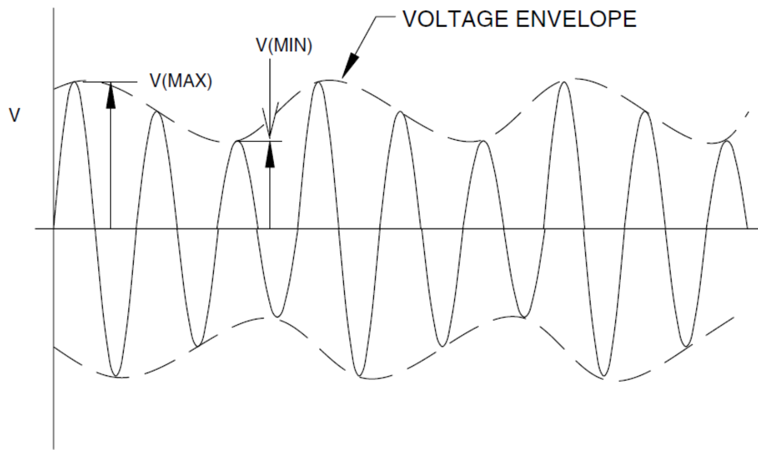


Figure 28-33 ارتعاش الجهد

أسباب حدوث ارتعاش الجهد:

3- نوعيةالأحمال فى المكان. التشغيل و الإيقاف المستمر للمكينات مثل الاسانسير

4- الأفران الكهربية (أفران صهر المعادن). تعطى أفران القوس الكهربى فكرة واضحة لمعنى ارتعاش الجهد ، حيث أنه لحدوث القوس الكهربى فإننا نحتاج تيار عالى مما يسبب انخفاض فى الجهد ، وعندما ينطفئ القوس الكهربى لا يمر تيار فيرجع الجهد لقيمته الأصلية وهكذا. وعلى ذلك فإن التيار يتغير عشوائيا خلال دوره الانصهار مما يسبب تغير (ارتعاش) فى الجهد . يمكن ملاحظة ذلك بشدة من خلال الرعشة التى تحدث للمصابيح المتوهجة المغذاة من نفس مصدر تغذية الأفران .

5- التوصيلات السيئة.

6- ماكينات اللحام بالمقاومة resistance welding بمصانع الحديد والصلب تسبب أيضا voltage fluctuation عند تغذية عدة ماكينات لحام من نفس محول التوزيع حيث يكون تشغيلها عشوائيا أحيانا كثير من ماكينات اللحام تعمل فى نفس الوقت

28.12.6تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة

التأثير على الأجهزة الإلكترونية

رغم أن هذه الأجهزة هى أحد أهم المصادر التى تسبب عدم جودة القدرة ، فإنها أيضا أكثر الأجهزة التى تعانى من عدم جودة المصدر ، فتحتاج الأجهزة الالكترونية إلى بيئة كهربية متحكم فيها أكثر من احتياج أغلب الأحمال الأخرى ، فعند حدوث انخفاض فى الجهد فعندئذ يتوقف الجهاز عن العمل أو تتشوه البيانات .

التأثير على المحركات

يؤدى الانخفاض فى الجهد على المحرك الحثى Induction Motors إلى :

1- انخفاض عزم البدء للمحرك مما قد يؤدى إلى تلف المحركات التى تدير أحمالا ميكانيكية ذات قصور ذاتى مرتفع لأن المحرك سيضطر لسحب تيار أعلى بكثير من المقنن ومن ثم تحرق ملفاته.

2- زيادة تيار البدء سيؤدى بالضرورة إلى حدوث Voltage Sag

3- إذا نجح المحرك فى البدء فستظل لديه مشكلة أثناء التشغيل لأن حرارة الملفات سترتفع بسبب ارتفاع قيمة التيار (تذكر أن هذه المحركات تعتبر Constant Power بمعنى أن انخفاض الجهد حتما سيؤدى لارتفاع التيار

التأثير على لمبات الإضاءة

أغلب نظم الإضاءة تكون قادرة على إحتمال حدوث الانحدارات في الجهد مثل:

اللمبات المتوهجة incandescent lamp

فالانخفاض فى الجهد سيؤدى إلى انخفاض الإضاءة لامحالة (90% انخفاض فى الجهد تؤدى إلى انخفاض الإضاءة إلى 70% من مقننها فى بعض اللمبات وانخفاض الكفاءة الضوئية إلى 80%) . لكن فى هذه النوعية من اللمبات يؤدى الانخفاض فى الجهد إلى زيادة العمر الافتراضى لأن تيار المصباح أيضا ينخفض (لا يعتبر من أجهزة الـ Constant Power)

مصابيح الفلورسنت fluorescent lamp

تتأثر هذه اللمبات بدرجة أكبر من اللمبات السابقة بسبب وجود Chock Coil ، وفى هذا النوع أيضا يتسبب الارتفاع أو الانخفاض فى تقصير العمر الافتراضى. وإذا انخفض الجهد بدرجة كبيرة (70%) مثلا فأنه يؤثر على الـ Electronic Ballast ويصبح غير قادر على تجهيز الطاقة لحدوث القوس داخل الأنبوبة و هذا يعني ظلام اللمبة ولكنها تعود للعمل مباشرة بعد رجوع الجهد لحالته الطبيعية.

مصابيح التفريغ شديدة الكثافة high intensity discharge – metal halide

مثل مصابيح الصوديوم والزئبق وهذه المصابيح تتأثر بشدة بتغير الجهد فينطفئ المصباح إذا انخفض الجهد عن 80% ، والمشكلة الأكبر أنه إذا تكرر الانقطاع والتوصيل فهذا يؤثر بشدة على العمر الافتراضى للمصباح إضافة إلى أنه يحتاج إلى وقت كى يبرد بعد كل إطفاءة قد تصل فى بعض المصابيح إلى 10 دقائق وهذا كله يعنى أن هذه المصابيح لا تصلح فى الأماكن التى تعانى من اهتزاز الجهد.

التأثير على المكثفات

معلوم أن هناك عدة أهداف من وضع المكثفات بالدائرة منها تحسين معامل القدرة عن طريق تغذية الحمل بجزء كبير من الـ Reactive Power التى يحتاجها. لكن المشكلة عند انخفاض الجهد إلى 90% من قيمته فإن الـ Q المولدة من المكثف تنخفض إلى 81% (تتناسب مع مربع الجهد) ، وهذه مشكلة كبيرة إذا أننا وضعنا المكثف ليساعدنا فى رفع قيمة الجهد فإذا به يتأثر هو نفسه سلبيا بانخفاض الجهد.

التأثير على الأجهزة المنزلية

بعض الأجهزة المنزلية التى لها محركات ثابتة القدرة تتأثر بشدة بانخفاض الجهد ، فمن المعلوم أن (P = V x I cos φ) ، ومن ثم فإى انخفاض بأى نسبة فى الجهد سيؤدى بالضرورة إلى ارتفاع فى التيار بنفس النسبة. والمشكلة أن هذا الارتفاع غالبا لا يكون كبيرا ، فلو فرضنا أن هذا الارتفاع فى التيار كأن بنسبة 10% فقط ، فهذا يعنى أن الـ CB لن يشعر بهذه الزيادة فى التيار وبالتالى لن يفصل الدائرة ، فى حين سيظل الجهاز يعانى من هذه الزيادة و من ثم ترتفع درجة حرارته تدريجيا مع الزمن حتى يصل لمرحلة الاحتراق. ومن هنا جاءت أهمية التأكد من عدم هبوط الجهد عن القيم القياسية المسموح بها.

28.12.7 وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد

قد يكون التغير فى الجهد صغيرا بحيث لا تسبب اى مشاكل للمعدات ولكن فى بعض الأجهزة الإلكترونية الحساسة فإن أى تغير فى الجهد يؤدى إلى انهيارات وتشغيل خاطىء. ولذلك اهتمت الصناعة بتصميم وتصنيع أجهزة الحماية لعلاج هذه المشاكل مثل:

1. مكيفات القدرة (Power Conditioners)
2. منظمات الجهد (voltage regulator)
3. مولدات الطوارىء (emergency power generators)
4. نظم البطاريات الاحتياطية (battery backup) أو UPS.

28.12.8 استخدام أجهزة الـــ Power Conditioners

تقوم الـ Power Conditioners بعمل عزل كهربى وتخفيض التشويش (electric noise) وفى بعض الوقت تعمل على تنظيم الجهد(voltage regulation). والمبدأ العام يتضح من الشكل 28-34 .

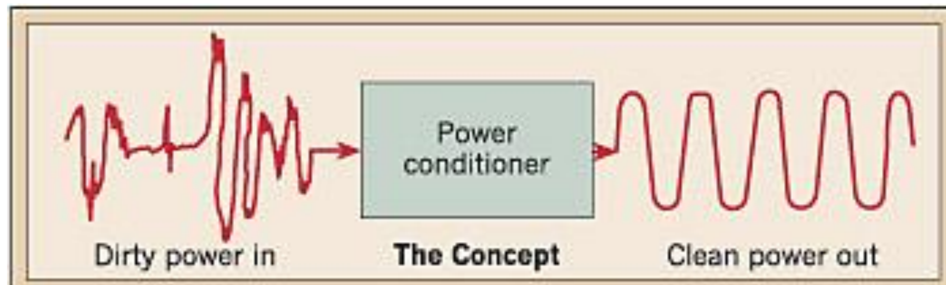


Figure 28-34 Power Conditioners

ومن أمثلة أجهزة الـ Power Conditioners مايلي:

1-محولات العزل (Isolation Transformer):

تعتبر المكون الرئيسى لـ Power Conditioners ويحتوي على مجموعتين من الملفات مرتبطين بقلب مغناطيسي مشترك. وهذه الملفات مفصولة عن بعضها بواسطة تحجيب مغناطيسي (magnetic shielding). هذا التحجيب يخفض أو يمنع التشويش الكهربى للحاله العادية وذلك بتحويله إلى نظام التاريض .

2- منظمات الجهد (voltage regulator)

فكرة عمله أنه يقوم بمراقبة مستوى الجهد المغذى لحمل معين ، ويعزز جهد الدخول بغرض تصحيحه إلى حدود محددة مسبقا. ويمكن أن يكون أحد مكونات الـ Power Conditioners أو منفصلا.

وسائل تنظيم الجهد:

1- نقط تقسيم الجهد يدويا/أتوماتيكيا Manual/Auto Tap switches regulator
2- منظم جهد رنين حديدي Ferroresonance Regulator
3- مولف شكل موجه الكتروني أو مغناطيسي Magnetic synthesizers

فالنوع الأول يعرف بمفاتيح التقسيم (tap- switchers) و التى تعالج التغير الكبير فى جهد المدخل مثلا من 80 إلى 145 فولت ، بينما تحافظ على جهد المخرج بين 110 و 125 فولت . تكون الاستجابة الزمنية حوالى دورة واحدة ، وهذه فترة طويلة نسبيا و يمكن أن تسبب مشاكل لبعض الأجهزة .

والنوع الثانى هو منظم الرنين الحديدى ، وهو أفضل منظم جهد للمدخل (Ferro resonant regulators) فهذا النوع يحافظ على استقرار المخرج بدرجة أفضل ، وله استجابة زمنية أسرع .

وفكرة عمل محول الرنين الحديدي Ferro resonant/Constant voltage transformer هي استخدام محول صغير في حدود 500VA ذو نسبة تحويل 1:1 ، بحيث يحدث له Excitation بدرجة عالية حتى يصل إلى درجة التشبع (saturation curve) ، فيعطي (output voltage) لا يتأثر بشكل ملحوظ بالجهد الداخل إليه ولذا يسمى أيضا بالمحول ثابت الجهد ((Constant–Voltage Transformers(CVTs)

3– نظم البطاريات الاحتياطية

وتستخدم نظم البطاريات الاحتياطية لتغذية الأحمال الحرجة عن طريق مصدر طاقة كهربائية مستمر Uninterruptible power supply (UPS) ، وعند تقلب مصدر التغذية الأساسي أو عند فصله فإن الـ UPS يغذي هذا الحمل من نظام البطاريات حتي يظل نظام الحمل مستمرا و لمدة تعتمد على خصائص البطارية الداخلية. والـ UPS نوعان :

On–line UPS

في هذا التصميم (شكل 28–35) تتم تغذية الحمل طوال الوقت من خلال الـ UPS ، وعند انقطاع الطاقة تتم تغذية الـ inverterمن خلال البطاريات ويواصل تغذية الحمل .

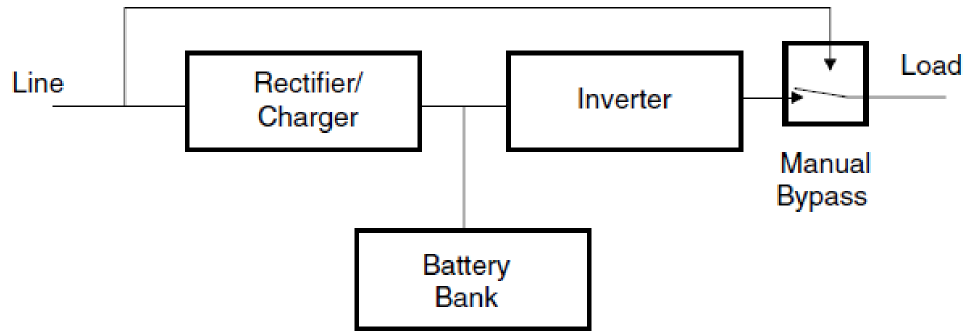


Figure 28-35 On-Line UPS

Standby UPS (Off–line UPS

في هذه الحالة (شكل 28–36) تتم تغذية الحمل عن طريق مصدر التغذية الرئيسي ، فاذا حدث انقطاع في هذا المصدر تتحول التغذية لتتم عن طريق ال UPS ، وتتم هذه العملية عن طريق ATS (Automatic Transfer Switch) . ويجب أن يعمل الـ ATS في سرعة كبيرة تصل إلى 4 ms حتي لا تتأثر الأحمال.

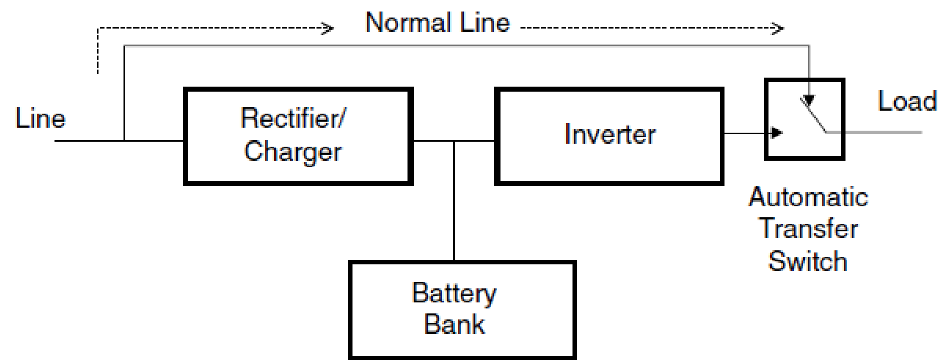


Figure 28-36 Off-Line UPS

29

إستقرار منظومة القوى الكهربية

POWER SYSTEM STABILITY

تعد دراسات الاستقرار Stability جزءاً أساسيا مِّن دراسات التخطيط طويلة الأمد لنظم القدرة الكهربية ، خاصة أنه مع توسع الشبكة الكهربية وامتدادها على مناطق جغرافية واسعة أصبح من الصعب المحافظة على التزامن Synchronization بين مختلف الأجزاء للمنظومة الكهربية ، ومعلوم أن فقدان هذا التزامن بين أجزاء الشبكة هو السبب الرئيسي لحدوث الـ Blackout الذى يمكن أن يضرب الشبكة.

29.1 ماذا نقصد بالـــ STABILITY

ووفقاً لتعريف IEEE – CIGRE فإن الاستقرار Stability هو قدرة النظام على العودة إلى شروط التشغيل الطبيعية بعد تعرضه لاضطراب Disturbance معين كما فى الشكل 29-1 .



Left: Active power (red) and reactive power (green) **Right:** Generator speed

Case 1: Stable

Figure 29-1

فكما هو واضح من الشكل فقد حدث اضطراب ما فى المنظومة وتغيرت قيمة الـ P and Q وكذلك السرعة لكن المنظومة فى خلال ثواني رجعت مرة أخرى إلى القيم الطبيعية ، فهنا نقول أن هذا النظام Stable .

ويقصد بالظروف الطبيعية هنا أن تكون عناصر الـ Power System الرئيسية الثلاثة وهى:

- Frequency
- Rotor Angle/ Power Angle
- Voltage

أن تكون جميعا ضمن قيم مقبولة حسب قيم الضبط من قبل مشغلي النظام وبهذا تبقى الشبكة بشكل عام مستقرة ، وبدون أن يؤدي هذا الاضطراب إلى تفعيل تجهيزات الحماية والتحكم ، وهو التفعيل الذى قد يترتب عليه فقدان بعض الأجزاء الرئيسية من النظام أو تجزئة الشبكة إلى جزر Islanding وهو الإجراء المتبع عادةً لتجنب حدوث الانهيار الكامل للنظام .

فأما الجهد والتردد فقيمتهما محددة ومعروفة فى الشبكة ، وأما قيمة Rotor angle فكما سنعلم لاحقا هى قيمة يمكن أن تتغير على مدى من صفر إلى 90 درجة ويظل النظام مستقرا ، وكلما كانت بعيدة عن 90 درجة كلما أن Stability margin واسعا ، وهذا يعنى أن المنظومة قادرة على استيعاب الهزات.

29.2 دلالات استقرار الشبكة

يعتبر استقرار منظومة القوى واحد من أكبر التحديات التى تواجه الشبكات الكبيرة Interconnected Networks وتزداد المشكلة تعقيدا كلما زادت محطات توليد وزادت الخطوط و الأحمال ، لأن هذه الشبكة معرضة للكثير من الأعطال ومعرضة أيضا لتغيرات فى ظروف التشغيل ، وهنا يظهر السؤال الرئيسى :

هل الشبكة سيمكنها تجاوز تأثير هذه الاضطرابات وتعود سريعا إلى حالة التوازن والاستقرار؟

وللإجابة على هذا السؤال نحتاج أولا لتحديد بدقة أهم الدلائل على استقرار الشبكة وهى :

1- أن يكون حجم الأحمال المركبة على الشبكة + Loss = حجم التوليد المتاح
2- أن تكون جميع المولدات المركبة على الشبكة فى حالة عمل متزامن Synchronized مع بعضها البعض
3- أن يكون التردد Frequency مستقرا حول قيمته الإسمية (50/60 Hz) فى أى نقطة بالشبكة
4- أن يكون الجهد عند كافة الـ BBs فى الشبكة قريب من قيمته الطبيعية
5- أن تكون جميع الخطوط والكابلات والمحولات والمولدات وغيرها تعمل جميعا وهى محملة بقيمة أقل من أو قريبة من القيمة المقننة لها بحيث يمكن أن تسمح بالزيادة ولكن لمدة وجيزة.

وبالطبع فالاستقرار بالشروط السابقة قد لا يتحقق فى الشبكة لأكثر من عدة دقائق ، فالشرط الأول على الأقل قد يتغير تقريبا كل عدة ثوانى نتيجة تغير الأحمال ، وبقية الشروط كذلك قد تتغير تغيرا بسيطا مع تغير الأحمال أو فى بعض الظروف قد تتغير تغيرا دراماتيكيا نتيجة حدوث عطل مثلا بالشبكة. والإضطراب Disturbance الذى يحدث فى الشبكة قد يستمر لمدة وجيزة أو لمدة طويلة Short and long term disturbance .

29.3 أهم المصطلحات والتعريفات

طبقا لتصنيف الـ IEEE ، فإن الدارس لموضوع الـ Stability عليه أن يوجه نظره إلى ثلاثة أنواع من الدراسات الخاصة بموضوع الاستقرار وهى :

1- استقرار التردد
2- استقرار الجهد
3- استقرار Rotor angle

وكل نوع من الأنواع السابقة له تصنيفات فرعية . ويبين الشكل 29−2 تصنيف عناصر استقرار نظم القدرة الكهربية أخذا فى الاعتبار أنواع الاضطرابات المختلفة حجميا وزمنيا. وفيما يلى شرح سريع لمعنى كل نوع من أنواع الـ Stability السابقة.

•

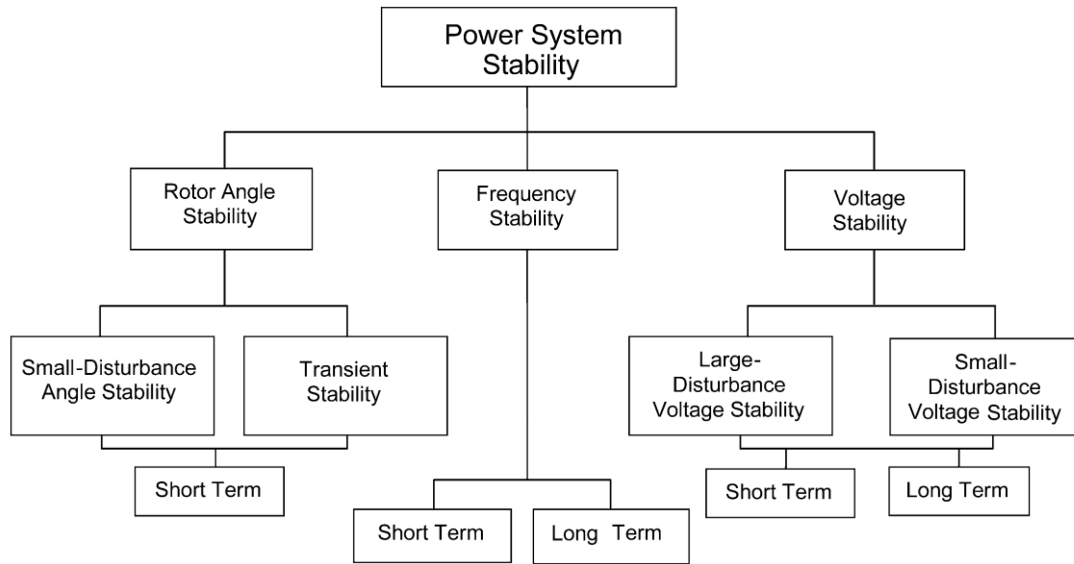


Figure 299-2 IEEE Stability Classification

29.3.1 Rotor Angle Stability

والمقصود بالـ Rotor Angle Stability هو قدرة Synchronous Machines الموجودة بالنظام على البقاء في حالة التزامن Synchronism بعد حدوث اضطرابات ، مع القدرة على الحفاظ أو استعادة التوازن بين العزم الكهرومغناطيسي و العزم الميكانيكي عند كل Synchronous Generator موجود في النظام عند حدوث اضراب فى المنظومة.

وبناء على قيمة هذا الاضطراب فى العلاقة بين العزم الكهربى والميكانيكى المؤثران على دوران المولد سيكون لدينا نوعين من الدراسات :

- فالاضطراب البسيط small disturbance يدرس تحت عنوان Steady State Stability
- أما الاضطراب المفاجئ والشديد large disturbance فيدرس تحت باب Transient Stability

أما عدم الاستقرار Unstabilitity فهو أن تخرج الشبكة Out Of Step أو يحدث فقدان للتزامن Unsynchrounism

29.3.2 Frequency Stability

التردد هو ترمومتر العلاقة بين التوليد المتاح بالشبكة ، والأحمال المتصلة بالشبكة.

والمقصود هنا هو قدرة النظام على معالجة النقص فى القدرة المتاحة Power Deficit أو بمعنى آخر علاج الاختلاف بين قيم التوليد المتاحة وقيم الأحمال المركبة ، والذى بناء على حجمه سيكون لدينا درجة ما من درجات عدم استقرار فى التردد .

29.3.3 Voltage Stability

ويقصد بها قدرة النظام على المحافظة على قيم الجهد ثابتة قدر المستطاع قريبا من القيم الاسمية بعد حدوث Disturbance بالشبكة . و غالبا تكون الدراسة فى هذا الموضوع تتعلق بالأحمال ، وتدور أغلب الحلول حول سبل تعويض النقص فى القدرة غير الفعالة Q لأن التغير فيها سيترتب عليه تغير فى قيمة الجهد (تذكر أن جهد المولد نتحكم فيه من خلال التحكم فى الـ Field من خلال زيادة أو نقص الـ Q).

وهذا الاضطراب فى الجهد :

- قد يكون صغيرا فيدرس تحت عنوان : Steady-state voltage stability
- وقد يكون اضرابا كبيرا فيدرس تحت عنوان : Dynamic Voltage Stability

ويمكن فى تلخيص سريع لما سبق أن نقول :

1- أن دراسة الـ Rotor Angle Stability تهتم بوضع المولدات المتزامنة بالنظام والتوازن الـ Electric- torque ، وبين الـ Mechanical Torque فى هذه المولدات
2- أما دراسة الـ Frequency Stability فتهتم بدراسة سداد العجز فى القدرة الفعالة Active Power بالنظام مع تحقيق أقل فصل ممكن فى الأحمال.
3- وأما دراسة الـ Voltage Stability فتهتم بدراسة سداد العجز فى القدرة غير الفعالة بالنظام Reactive Power.

29.3.4 صعوبة دراسة موضوع الـ Stability

منظومة الـ Power System عموما مصممة على أن تكون Stable خلال الاضطرابات التى تحدث كثيرا ، لكن بالطبع لايمكن أن تصمم منظومة وتكون Stable تحت كافة ظروف التشغيل. وصعوبة دراسة هذا الموضوع تكمن فى سببين :

1- السبب الأول هو أن منظومة الـ Power system يمكن وصفها بأنها Non-Linear System وهذا يعنى أنه إذا تعرض النظام لعدة متغيرات فإن استجابته System Response لهذه المتغيرات ليست بالضرورة أن تكون مماثلة لمجموع استجاباته لكل متغير على حدة ، كما هو الحال فى الـ Linear System وهذا ما يعقد الموضوع أكثر ، لأن توقع أداء الـ Non-Linear System ليست بالسهولة كما فى حالة الـ Linear System.

2- السبب الثانى أن استجابة الـ Power System لأى Disturbance ليس فقط معقدة رياضيا كما فى السبب الأول ولكن أيضا معقدة من حيث سعة انتشار ، فتأثير أى عطل يطال العديد من عناصر منظومة القوى ، فحدوث عطل Short circuit مثلا على خط ثم فصل هذا الخط بواسطة أجهزة الوقاية وعزله بفتح الـ Circuit Breakers الخاصة به سيترتب عليه تغير فى الـ Power flow فى العديد خطوط الشبكة ، وهذا قد يؤدى إلى حدوث تغييرات فى قيم الجهد عند بعض الـ BBs وقد يؤدى ذلك إلى تشغيل بعض الـ Voltage Regulators ومن ثم قد تتغير أيضا سرعة بعض المولدات فينشأ عن ذلك تغييرات فى Frequency وتدخل من الـ Governors . ومن ثم فعطل واحد دفعنا إلى دراسة الأنواع الثلاثة من أنواع الـ Stability .

وفيما يلى ندرس تفصيلا الأنواع الثلاثة لدراسات الاستقرار.

النوع الأول من دراسات استقرار الشبكة:

ROTOR ANGLE STABILITY 29.4

معلوم أن المولد الكهربى يوجد داخله مجالان مغاطيسيان :

1- الأول ويسمى Rotor Magnetic Field ، وينشأ هذا المجال من دوران الـ Rotor– الذى يحمل أقطابا مغناطيسية – بواسطة القوة الميكانيكية الخارجية (البخار مثلا أو المياه المندفعة من السدود).

2- الثانى يسمى Stator Magnetic Field ، وهذا نشأ من ظهور الـ Three phase voltages والتى نشأت حسب قوانين فراداى داخل الـ three phase windings ومايترتب على ذلك من مرور التيار ، ومعلوم أن مرور Three phase currents داخل three phase windings سوف يولد Rotating field .

و قوة المجال الثانى تتوقف على شدة التيار المسحوب من المولد وهذا بالطبع يتوقف على قيمة الحمل الموصل عليه ، كما أن سرعة دوران المجال الثانى – و تسمى Synchronous speed, N – تتوقف قيمتها على عدد الاقطاب P فى الماكينة والتردد F الخاص بالمصدر حسب العلاقة

$$N = 120\ F/P$$

بمعنى آخر ، فإنه عند دوران الـ Rotor بعزم ميكانيكى T (Mechanical) ، فإنه ينشأ مجالا مغناطيسيا يسمى بالـ Rotor magnetic field، وهذا المجال سيقطع الملفات الموجودة فى الـ Stator فينشا فيها جهدا حسب قوانين فرادى ، وهذا الجهد سينتج عنه مرور تيارات فى الحمل الكهربى الموصل على المولد ، وهذه التيارات تنشأ مجالا مغناطيسيا جديدا معاكسا للمجال الأول هو الذى نسميه بالـ Stator magnetic Field ، تتوقف قوتها على قيمة الحمل الكهربى الموصل على المولد.

29.4.1 تعريف زاوية الـ Rotor Angle

وفى الظروف الطبيعية يكون الـ T (Mechanical) = T(Electric) ، ويكون كلا المجالين المغناطيسيين : الـ Rotor magnetic field ، والـ Stator magnetic Field يدوران بنفس سرعة الـ Synchronous speed, N ، ولكن توجد بين الـ Rotor field وبين الـ Stator field زاوية هى التى نسميها **Rotor angle** مع التأكيد مرة أخرى على أنهما يدوران بنفس السرعة وهناك فقط Phase shift بينهما.

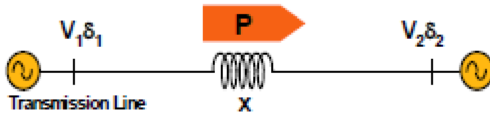
29.4.2 التحكم فى الـ Rotor Angle

يمكن التحكم فى الـ Rotor Angle, عن طريق التحكم فى القدرة الميكانيكية الداخلة إلى الـ Rotor من التربينات البخارية مثلا ، فإذا زادت هذه القدرة الميكانيكية الداخلة فإن الـ Rotor تزداد سرعته ومن ثم تتغير الزاوية الموجودة بين الـ Rotor and Stator Fields ثم تعود السرعة للقيمة الطبيعية ولكن بعد حدوث التغير المطلوب فى الزاوية.

لاحظ أنه عند زيادة حمل كهربى سيزداد التيار وهذا سيؤدى إلى كون T(Electric) > T (Mechanical) فتقل سرعة الـ Rotor وهنا يتدخل الـ Governor ليضخ بخارا أكثر ، أى قدرة ميكانيكية أكبر فتزداد سرعة دوران الـ Rotor ويعود مرة أخرى لتتساوى سرعته مع سرعة دوران Stator Field لكن بفرق زاوية بينهما أكبر من المرة السابقة ، ومن ثم يجب أن يكون واضحا أننا حين نقول "زيادة سرعة الـ Rotor" فهذا لايعنى أبدا أنه سيدور بسرعة مختلفة عن سرعة Stator Field لكن المقصود أنها زيادة مؤقتة أو هى زيادة السرعة التى انخفضت أصلا بسبب زيادة الأحمال حتى تتغير قيمة Power angle ومن ثم يمكن نقل قدرة أكبر .

29.4.3 تأثيرات ناتجة عن تغير الـ Rotor Angle

ويترتب على تغير قيمة الـ Rotor Angle لمولدات موجودة فى جهة ما من خط نقل حدوث تغير أيضا فى قيمة ما نسميه بالـ **Power Angle** وهى الزاوية التى تظهر فى المعادلة المشهورة التى تحدد قيمة القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين محطتين لهما جهد V_2 and V_t ويربط بينهما Transmission Line له معاوقة قدرها X.



$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

فالزاوية δ_{12} هى التى تعرف بالـ Power Angle وكلما زادت هذه الزاوية كلما زادت القدرة المنقولة بين المحطتين ، وتغيير هذه الزاوية يحتاج لتغيير الـ Rotor angle فى مولدات أحدى المحطتين عن طريق تغيير القدرة الميكانيكية الداخلة لهذا المولد.

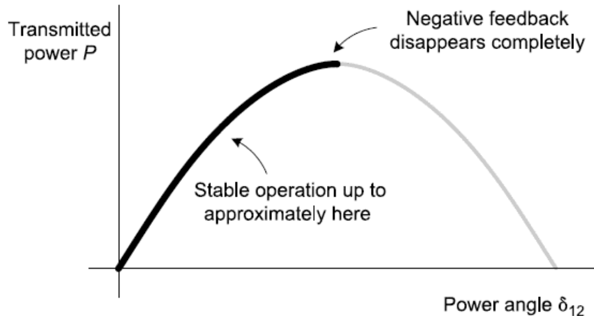


Figure 299-29-3

مع ملاحظة أننا يجب ألا نسمح بزيادة هذه الزاوية أكثر من 90 درجة (الزاوية الحرجة) لأنه بعدها تتسبب زيادة الزاوية فى انخفاض القدرة المولدة كما هو واضح من الشكل 29-3.

29.4.4 صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ Rotor Angle

عند حدوث تغير كبير نتيجة خروج محطة توليد مثلا أو حدوث أى عطل مؤثر ، ففى هذه الحالة يكون العلاج صعبا بسبب حدوث اضطرابات كبيرة فإن فروق الزوايا Rotor angles للمولدات قد تكون كبيرة لدرجة تؤدي إلى خروج المولدات عن التزامن ، وقد نحتاج إلى Load shedding لإعادة التزامن بين وحدات التوليد المركبة على الشبكة وهذه الظاهرة أو هذا النوع من الدراسات يسمى بالـ Transient Stability. وبالطبع فالـ Transient Stability هو الأخطر والأهم لأنه قد يترتب عليه حدوث عدم تزامن بين وحدات التوليد .

ومشاكل الـ Transient stability معقدة لأنها تحدث خلال أقل من ثانية واحدة وتؤثر بشدة على المولد القريب من مكان الاضطراب. وهى أصعب أنواع الدراسات من وجهة النظر الرياضية لأننا نحتاج لتمثيل النظام بواسطة مجموعة من المعادلات التفاضلية الغير خطية (لأن التغير يحدث فى زمن ضئيل جدا) على عكس النوع الأول من الدراسات (Steady State Stability) التى نستخدم في تمثيل النظام مجموعة من Linear Equations.

وعموما ، فالـ Rotor angle Stability هو الأقدم من حيث الاهتمام به ومن حيث الدراسات التفصيلية الخاصة به ، فالنوعين الأخرين (استقرار التردد ، واستقرار الجهد) لم يظهر الاهتمام بهما إلا بعد ظهور مشاكل Power Quality ، ومع ازدياد تعقد الشبكات .

والجزء التالى يشرح بمزيد من التفصيل موضوع Transient Stability من خلال ما يعرف بالـ Equal Area Criteria والتى تمثل طريقة لفهم وتوقع تصرف النظام عند حدوث Transient Stability .

29.5 دراسة الـ EQUAL AREA CRITERIA

29.5.1 مفهوم الـ Equal Area Criteria

لنفترض أن لدينا موتور ضخم يمثل يتغذى كهربيا من الشبكة بالشبكة ، وأنه فى وضع مستقر حيث العزم الكهربى يساوى العزم الميكانيكى لهذا الموتور $P_e = P_m$ كما فى الشكل 29-4 الذى يمثل علاقة القدرة الكهربية من المولد وعلاقتها بالـ Rotor angle, δ والتى سبق أن ذكرنا أنها يجب ألا تتجاوز 90 درجة حتى لا يخرج المولد عن وضع الاستقرار.

وفى الشكل السابق نجد الحمل المبدئى الميكانيكى المتصل على الموتور هو Initial Output, P_0 مرسوم عند نقطة a فى الشكل ، و زاوية القدرة تساوى δ_0 ، والنظام حتى الآن مستقر.

الآن نفترض حدوث زيادة مفاجئة فى قيمة الحمل على الموتور ليصبح عند قيمة Changed Output, P_s كما فى الشكل.

ولكى يظل الوضع مستقرا فلابد من أن تزيد قيمة القدرة الكهربية الداخلة على الموتور ، بمعنى يجب أن تنتقل نقطة التشغيل إلى النقطة b ، فكيف سيحدث ذلك؟

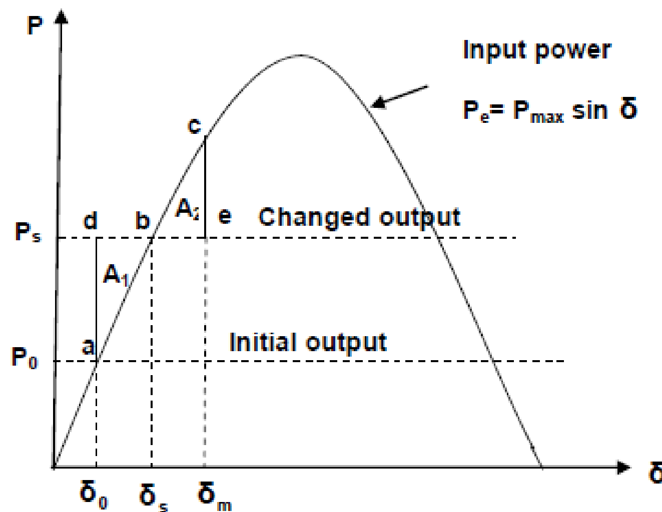


Figure 29-4 شرح مبدأ المساحات المتساوية

فى الفترة الزمنية من نقطة a إلى نقطة b ونتيجة زيادة الحمل الميكانيكى فجأة بدرجة أكبر من القدرة الكهربية الداخلة فسيحدث انخفاض فى السرعة (de-acceleration) وهذا يعنى انخفاض فى الجهد E (جهد التوليد يتناسب طرديا مع سرعة دوران المولد) ، وبالتالي يزيد التيار الداخل للموتور ($I = V-E/X$) وهذا يترتب عليه

أن تزيد القدرة الكهربية P_e ، وهذا يعنى من الرسم أن زاوية القدرة δ_0 ستزيد لتصبح δ_s وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هى b والتى عندها أصبحت $P_m = P_e$.

بالطبع كنا سنكون سعداء لو انتهى الأمر عند هذا الحد ، لكن هذا الانتقال لن يكون سلسا ، بل سيحدث نوع من الـ Oscillation حول نقطة b التى كان يفترض أن يستقر عندها النظام حسب الحمل الجديد ، فالمشكلة أن تزايد السرعة لن يتوقف فجأة حين يصل إلى نقطة b بل سيستمر تزايد السرعة نتيجة Spinning Energy of heavy Rotor ومن ثم تزايد الزاوية حتى تصل إلى قيمة δ_m ، وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هى النقطة c.

ونتج عن هذا التذبذب ظهور مساحتين A1 and A2 ، تقعان فوق وتحت القيمة الجديدة للحمل ، كما فى الشكل. ويمكن أن نقول أن المساحة الأولى A1 تتناسب مع قدرة النظام على تسريع الاهتزاز ، بينما المساحة الثانية A2 تتناسب مع قدرة النظام على تباطؤ الاهتزاز.

ومبدأ المساحات المتساوية Equal Area Criteria ينص على أنه فإذا تساوت المساحتان فإن النظام حتما سيأخذ وقتا ثم يستقر ، أما إذا زادت مساحة A1 عن مساحة A2 فسيزداد التسارع ويتسع الـ Oscillations حتى تتجاوز الزاوية δ_m قيمة 90 درجة ويخرج النظام Out of Step .

وطبقا لمبدأ المساحات المتساوية فإنه إذا كانت هاتان المساحتان متساويتان كما فى الشكل فسيحدث نوع من التذبذب حول نقطة b لكن سيستقر النظام فى النهاية . وتفسير ذلك أنه خلال الفترة من b إلى c تكون P_e أكبر من P_m فتتزايد سرعة الموتور , وبالتالى يزيد الجهد E ، وبالتالي يقل التيار (تذكر أن ($I = V-E/X$) ، ومن ثم تقل القدرة الكهربية الداخلة

فتقل الزاوية δ وتتراجع فى اتجاه النقطة b ويظل التذبذب حول النقطة b بالزيادة والنقصان حتى تستقر فى النهاية نتيجة وجود Damping فى المنظومة.

والشكل 5-29 يظهر ثلاث حالات مختلفة لهذه المساحات فالحالة الأولى Case-a وفيها A2=A1 نجد النظام مستقرا كما سبق شرحه ، وأيضا فى الحالة الثانية التى يكون فيها الاستقرار حرجا لأن A1=A2 لكن عند حافة منطقة الاستقرار ، بينما فى الحالة الأخيرة Case-c نجده غير مستقر لأن A1>A2 .

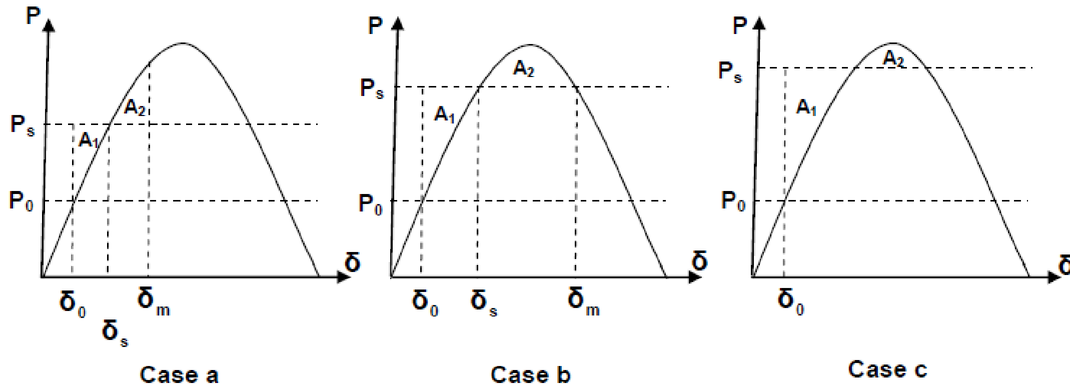


Figure 299-29-4 حالات مختلفة للمساحات

ومن خلال هذا المبدأ يمكن فهم وتفسير بعض الظواهر المؤثرة على استقرار الشبكة بصورة بعيدة عن المعادلات الرياضية كما فى الأمثلة التالية.

29.5.2 تأثير وجود خطين متوازيين بين المصدر والحمل على الـ Stability

فى هذه الحالة سيكون لدينا منحنيان للقدرة المنقولة كما فى الشكل 29-6:

- الأول وهو الأكبر يمثل القدرة المنقولة فى وجود خطين
- والثانى وهو الأصغر يمثل القدرة المنقولة لو خرج أحد هذين الخطين

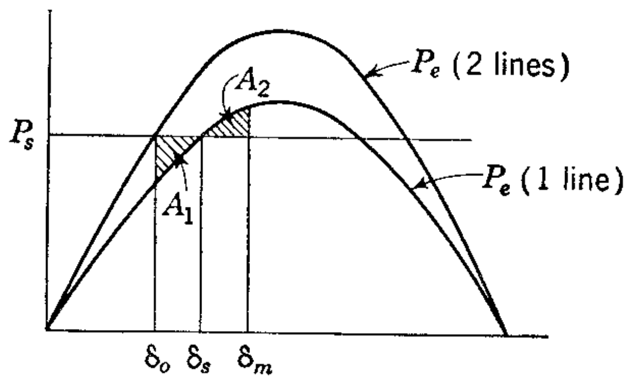


Figure 29-6 خروج خط من الخدمة

لاحظ أن الـ Power angle المطلوبة فى حالة وجود خطين $δ_0$ أصغر بكثير من الزاوية فى حالة وجود خط واحد $δ_s$ ، وهذا يعنى أن النظام فى وجود خطين أكثر استقرارا لأنه أبعد عن قيمة الـ 90 درجة التى تمثل stability margin .

كما أن التغيير فى الحمل فى وجود خطين يؤدى إلى حدوث تغيرات بالزيادة والنقصان حول قيمة زاوية القدرة ، هذه التغيرات تكون أصغر بكثير منه لو كان المستخدم هو خط واحد ، وهذا يعنى أن النظام قادر على استيعاب الهزات فى الحمل بدرجة أكبر لو كان هناك خطين.

ماذا يمكن أن نفعل لتجنب عدم الاستقرار عند خروج أحد الخطين؟

بالنظر للمثال المرسوم فى الشكل 29-6 سنجد أنه فى وجود خطين كان زاوية القدرة δ_0 تساوى حوالى 25 درجة فلما خرج أحد الخطين أصبحت تقريبا 60 درجة إى اقتربت من الحد الأقصى للاستقرار وهذا يعنى أن لدينا إحتمالا ليس بالقليل أن الـ Oscillations المتوقع حدوثه لحظة خروج أحد الخطين يمكن أن يأخذ النظام إلى منطقة عدم الاتزان .

فعقب خروج أحد الخطين (وهذا يمثل نوع من أنواع الـ Disturbance التى يمكن أن تحدث) فيفترض أن يعمل النظام بزاوية جديدة هى δ_s ولكن لأننا نتعامل مع نظام ميكانيكى يحتاج إلى وقت للاستقرار بسبب الـ Inertia الموجودة فيه وبالتالي فإن هناك Oscillations سيحدث حول القيمة الجديدة للزاوية بحيث يمكن أن تصل زاوية القدرة لقيمة δ_m بالزيادة ، كما يمكن أن تصل إلى قيمة δ_0 بالنقصان ، ومن ثم تظهر كما فى الشكل 29-7 مساحتين هما A1 and A2 قيمة كل منهما تتوقف على قيمة الزاوية التى يصل إليها الـ Oscillations.

فلو كان الحمل الموجود قبل فصل أحد الخطين عاليا (أو كانت قدرة نقل القدرة للخط المتبقى منخفضة) فعندها ستصبح A1>A2 كما فى الجزء الأيمن من الشكل 29-7 ، بينما لو كان الحمل أقل من قدرة الخط المنفرد فسنصل لحالة الاستقرار كما فى الجزء الأيسر من الشكل.

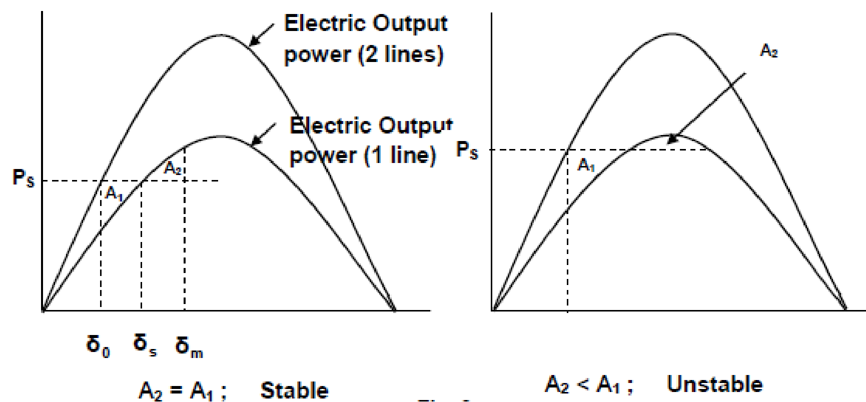


Figure 29-7 حالات خروج خط من الخدمة وتأثير ذلك على الاستقرار

ولتجنب ذلك يمكن مثلا أن نفصل بعض الأحمال قبل فصل أحد الخطين (هذا إذا كان الخروج مبرمجا وليس بسبب عطل مفاجئ).

29.5.3 تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة

يمكن فهم هذه النقطة بعيدا عن الرياضيات المعقدة باستخدام مبدأ المساحتين المتساويتين كما فى الشكل 29-8 . و الجزء العلوى منه يمثل نظاما كان يعمل عند زاوية δ_0 على المنحى الأول Pre-fault عندما كان لدينا خطين فى الخدمة ، ثم بعد حدوث عطل فانتقلت نقطة التشغيل إلى المنحى الأصغر During Fault حيث القدرة المنقولة محدودة جدا بسبب انخفاض الجهد أثناء العطل ، ثم تم فصل الخط المعطل وبقى خط واحد فحدث الاهتزاز حول النقطة δ_c التى حدث عندها إزالة Clearing للعطل. وحيث أن A1=A2 كما فى الشكل فإن النظام فى النهاية سيحدث له استقرار.

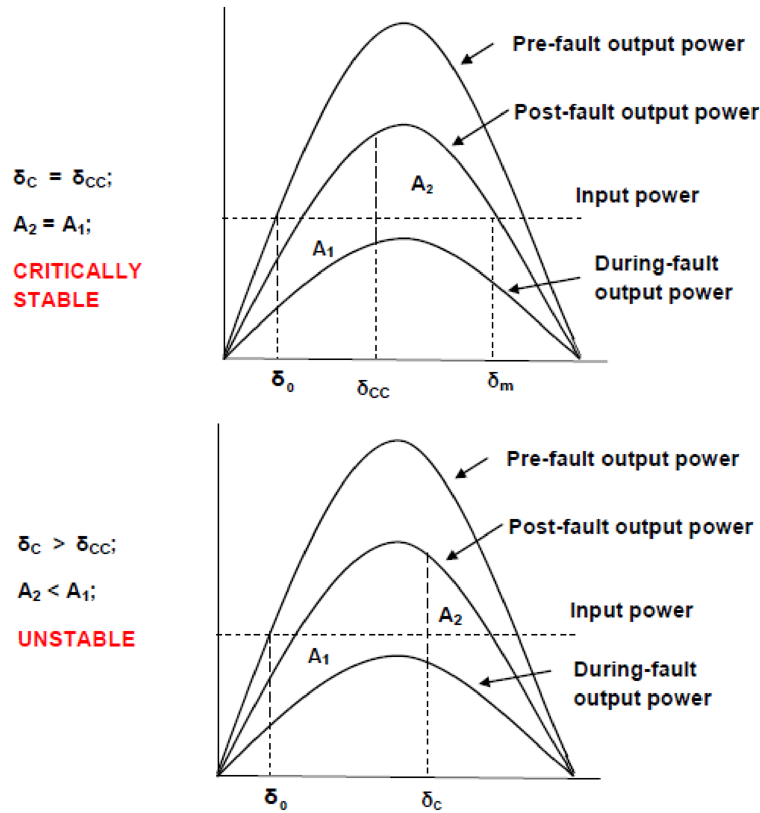


Figure 29-8 تأثير سرعة فصل الأعطال

بينما فى الجزء السفلى من الشكل ، حدثت إزالة متأخرة للعطل (لاحظ كيف أن δ_c بعيدة δ_0) ومن ثم أصبحت A1>>A2 ، فقطعا سينتهى الأمر بخروج النظام Out of step.

النوع الثانى من دراسات الاستقرار:

29.6 FREQUENCY STABILITY

يعتبر التردد هو العامل الذي يوازن بين الـ Load output Power و الـ Generated input power، والشكل 29–9 يشرح العلاقة بين القدرة المتولدة والأحمال المتصلة بالشبكة من جهة ، وبين التردد من جهة أخرى ، فكما هو موضح فإن حدوث فصل لأحمال كبيرة بصورة مفاجئة (وهذا يكافئ ازدياد التوليد عن الحمل) فهذا يؤدي إلى حدوث زيادة فى التردد . أما دخول أحمال زائدة على الشبكة بصورة مفاجئة أو لخروج بعض محطات التوليد فيؤدى إلى انخفاض التردد.

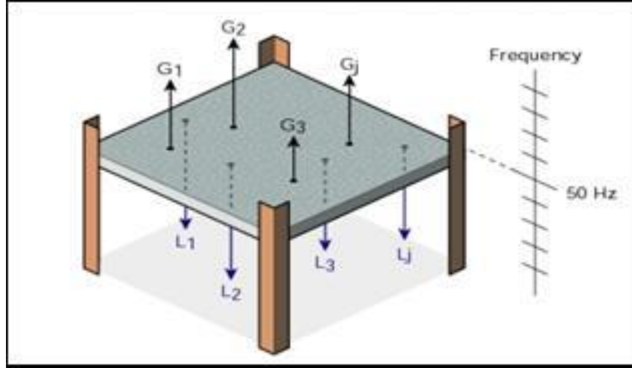


Figure 29-9 علاقة التوليد والأحمال والتردد

ومن ثم فالتردد هو ترمومتر الاتزان فى الشبكة ، وعادة لا يسمح للتردد أن يقل عن 49.2 HZ أو يزيد عن 50.3 HZ. لاحظ المدى فى شبكتى شرق الصين ووسط أوروبا فى الشكل 29–10.

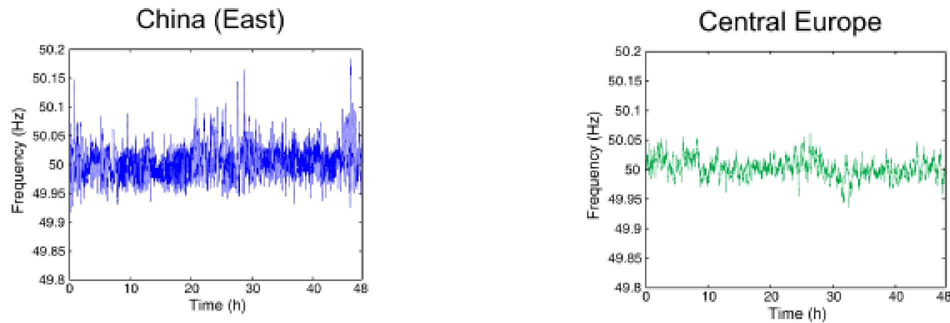


Figure 29-10 تغير طفيف فى التردد فى الشبكات الكبيرة

29.7 تأثير الـ INERTIA على حجم التغير فى التردد

تقاس الـ Inertia بمقياس Hz/MW وكلما صغر ذلك المؤشر كان ذلك يعنى أن الـ Inertia كبيرة وأن المولد ضخم ، و كلما كان المولد كبيرا فى الحجم كلما كان اتزانه أكبر كما هو واضح من الشكل 29–11 ، فإن فقد نسبة من التوليد تؤدى إلى نسبة تغير فى التردد أصغر كثيرا فى المولدات التى لها Inertia كبيرة. ومن ثم كان هذا العامل هاما جدا فى توصيف المولدات.

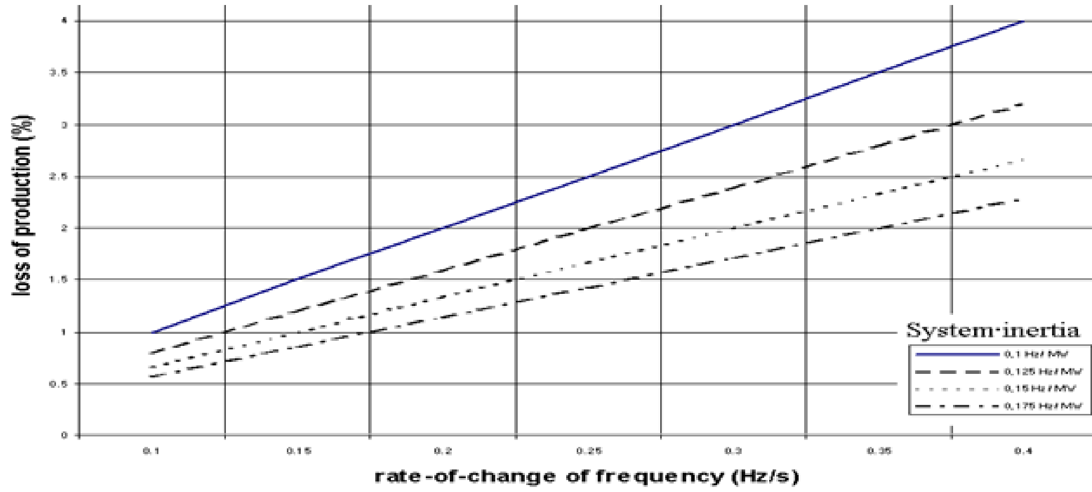


Figure 29-11 Effect of Generator inertia on the Stability

29.7.1 المجالات التى يتغير فيه التردد

يتغير التردد فى Bands مختلفة على النحو الذى يظهر فى الشكل 29-12 وتعريفها كالتالي:

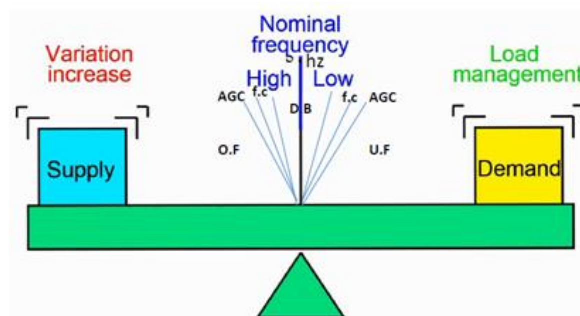


Figure 29-12 مجالات تغير التردد

1- DB: Dead Band

هو مجال يسمح فيه بتغير التردد دون رد فعل من الشبكة أو الوحدة

2- F.C: Frequency Correction

هو مجال يحدث فيه تغير فى التردد و لكن هناك رد فعل تلقائى من خلال الـ Governor

3- AGC: Automatic Generation Control

هو مجال يحدث فيه تغير التردد و لكن يكون رد الفعل عن طريق مركز التحكم القومى وأحيانا يكون من خلال المحطة نفسها.

4- UF: Under Frequency

هو مجال يحدث فية انخفاض شديد فى التردد مما يؤدى إلى فصل الأحمال Load shedding عن طريق مراكز التحكم بنسب معينة.

5- OF: Over Frequency

هو مجال يحدث فية ارتفاع شديد فى التردد مما يؤدى إلى فصل التوليد Blackout عن طريق منظومات الوقاية بالوحدة.

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول فصل الأحمال يختلف من بلد لاخر. والجدول التالي يمثل حدود ونسب الفصل فى مصر.

التردد Hz	نسبة فصل الحمل
49.2	%2
49.1	%3
49	%4
48.9	%7
48.8	%20
48.7	%20
48.6	%22

وتنشأ اضطرابات التردد دائما بعد حدوث اضطراب فى تغذية القدرة الفعالة كخروج محطة توليد كبيرة مثلا أو انقطاع خطوط الربط معها.

29.8 كيف يمكن علاج مشاكل الـ POWER DEFICIT؟

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد شئ ضرورى فى الشبكة لاستقرارها غير أن التغير فى التردد شئ طبيعى ومقبول إذا كان فى مدى صغير فإذا زاد عن ذلك فيمكن التحكم فيه بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير فربما

نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد التغير جدا فسنصل إلى الفصل التام للأحمال Blackout.

29.8.1 مراحل التحكم فى التردد:

توجد عدة وسائل للتحكم فى تغيرات التردد ، بعضها سريع جدا والآخر يستغرق وقتا كما يلى:

Primary control (1s to 15s) :

عندما يحدث تغير كبير فى استهلاك الطاقة يقوم الـ primary control بتنظيم التردد بواسطة الـ governor. عند حد معين وليس بالضرورة إلى قيمته الثابتة .

Secondary control (15s to 3min):

يستغرق وقت أكثر من الـ primary control ولكنه يقوم بإعادة التردد إلى قيمته الثابتة وهذا يحدث تلقائيا ولكنه متمركز بمعنى أن نطاقه محدود من حيث المساحة ، ولذلك فكل مولد يحتوى على primary control ولكن ليس كل مولد يحتوى على secondary control

Tertiary control :

يستغرق وقت أكثر من الـ secondary control ووظيفته استعادة التردد الأصلى للمولدات المتشاركة فى الـ secondary control عن طريق توزيع الأحمال بينهم أو عن طريق تشغيل مولد اضافى وهذا ممكن أن يحدث أتوماتيكيا أو يدويا.

Time control:

هو آخر مستوى فى التحكم والذى يستغرق وقت أكثر من كل الأنواع السابقة وهو يقوم بقياس التردد كل يوم للتأكد أنه فى نطاق التغير المسموح به.

النوع الثالث من دراسات الاستقرار:

VOLTAGE STABILITY 29.9

حتى نهايات السبعينات كانت كل الكتب التى تدرس موضوع الـ Stability تدرسها من وجهة نظر استقرار عمل المولدات فقط والتوازن بين العزم الكهربى والميكانيكى فى داخل المولد. ثم بدأ الاهتمام يتزايد بنوع آخر من أنواع الـ Stability وهو الـ Voltage Stability ، وذلك مع تكرار حدوث عدة ظواهر جديدة على الشبكة آنذاك ، منها:

- Voltage Fluctuations
- Voltage Flickers
- Voltage Collapse

وبعد تحليل أسباب هذه الظواهر تبين أن دراسة الـ Voltage Stability لا تقل بل تزيد فى الأهمية عن دراسة النوع الأول من أنواع الـ Stability وأنه فى الغالب قد يكون سببا لمعظم حوادث انهيار النظام.

وسندرس هنا فقط المظهر الثالث بشئ من التفصيل لشدة خطورته .

وهذا النوع من الدراسة يهتم بدراسة العلاقة بين Demand and Load Supply .

وعلى عكس الـ Rotor Angle Stability التى تهتم بوضع المولدات المتزامنة فى النظام فإن الـ Voltage Stability يهتم بوضع الأحمال Loads فى النظام ، وأكثر التركيز يكون على دراسة سد العجز في قيم القدرة غير الفعالة التى تحتاجها الأحمال المركبة فى المنظومة .

وأهمية هذه الدراسات تكمن فى أن الارتفاع أو الانخفاض فى الجهد قد يؤدى إلى فصل بعض أنواع من الأحمال أو بعض الخطوط بواسطة أجهزة الحماية وهذا بالتبعية قد يؤدى إلى هزات فى النظام منها ، كما يمكن أن تتأثر المضخات والمحركات ومساعدات محطة التوليد الأمر الذى قد يؤدى لخروج المحطة من الخدمة ، وقد يترتب عليه حدوث الخروج المتتابع cascaded outage والذى يمكن أن يؤدى إلى حدوث Blackout .

وكما ذكرنا سابقا فجميع أنواع الـ Stability قد تحدث متتابعة فخروج مولد نتيجة Rotor angle instability يمكن أن يؤدى إلى حدوث انخفاض فى الجهد عند العديد من الـ BBs وهكذا.

29.10 أنواع الـ VOLTAGE STABILITY

يوجد نوعان من الدراسات المتعلقة باستقرار الجهد:

1. Dynamic Voltage Stability
2. Static Voltage Stability

النوع الأول عبارة عن اهتزاز Fluctuation فى الجهد نتيجة دخول أجهزة من النوع Fast acting devices مثل المحركات الحثية Induction Motors أو أجهزة HVDC والوقت المتاح لاستيعاب هذه الهزات فى حدود 10−20 ثانية ، وهذا يصنف short term phenomenon.

أما النوع الثانى فيحدث لو كانت التغير الحادث فى الجهد ناتج عن تغير بطئ فى الحمل أو نتيجة تحميل زائد مثلا أو تغير فى Tap Changing Transformers ففى هذه الحالات سيكون لدينا وقت فى حدود عدة دقائق للتعامل مع الظاهرة وتصنف Long term phenomenon

29.10.1 ظاهرة انهيار الجهد الـ Voltage Collapse

وتعنى أن جهد BB معين يصل للصفر فجأة بدون حدوث أى عطل مرئى أو مادى. فالمراقب العادى فى هذه الحالة حين يرى أن الجهد وصل إلى الصفر فسيحكم لا محالة بأن هناك Short Circuit قد حدث بل وأن هذا القصر قريب جدا من الـ BB بحيث تسبب فى هذا الانهيار السريع والكبير للجهد ، لكنه سيكتشف عدم وجود أى قصر ، والواقع أن السبب هو حدوث Voltage Instability أدى إلى حدوث انهيار للجهد Voltage Collapse كما سنرى.

29.11 أساسيات دراسة استقرار الجهد

ولدراسة هذا النوع من الاستقرار نحتاج دائما لدراسة بعض أنواع من المنحنيات أهمها P−V and Q−V.

ولدراسة هذا الموضوع فإننا نبدأ بمنظومة صغيرة كما فى الشكل 29−12.

فقيمة القدرة الفعالة المنقولة عبر هذا الخط التى ستصل للحمل ، وكذلك القدرة غير الفعالة الواصلة للحمل ستساويان على التوالى :

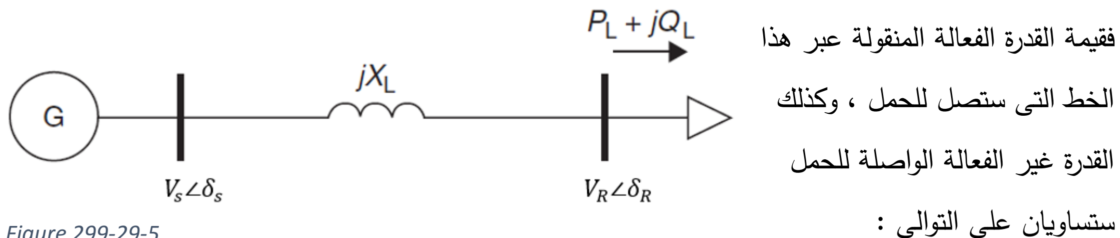


Figure 299-29-5

$$P_L = -\frac{V_s V_R}{X_L}\sin\delta$$

$$Q_L = -\frac{{V_R}^2}{X_L} + \frac{V_s V_R}{X_L}\cos\delta$$

بحل المعادلتين السابقتين بحثا عن قيمة V_R وهى قيمة الجهد عن الحمل نحصل على المعادلة :

$$V_R = \sqrt{\frac{{V_s}^2}{2} - Q_L X_L \pm \sqrt{\frac{{V_s}^4}{4} - {X_L}^2 {P_L}^2 - X_L {V_s}^2 Q_L}}$$

وهذه المعادلة لها حلين وهذا واضح من رسم منحنى الـ P-V فى الشكل 29-13 والذى يسمى فى معظم المراجع بالـ Nose curve أو منحنى الأنف. بمعنى أنه لكل قيمة للقدرة الواصلة للحمل (سواء كان Load1 or Load2) سيكون لدينا قيمتان للجهد المتوقع عند جهة الحمل إحداهما فى الجزء العلوى من المنحنى والآخرى فى الجزء السفلى:

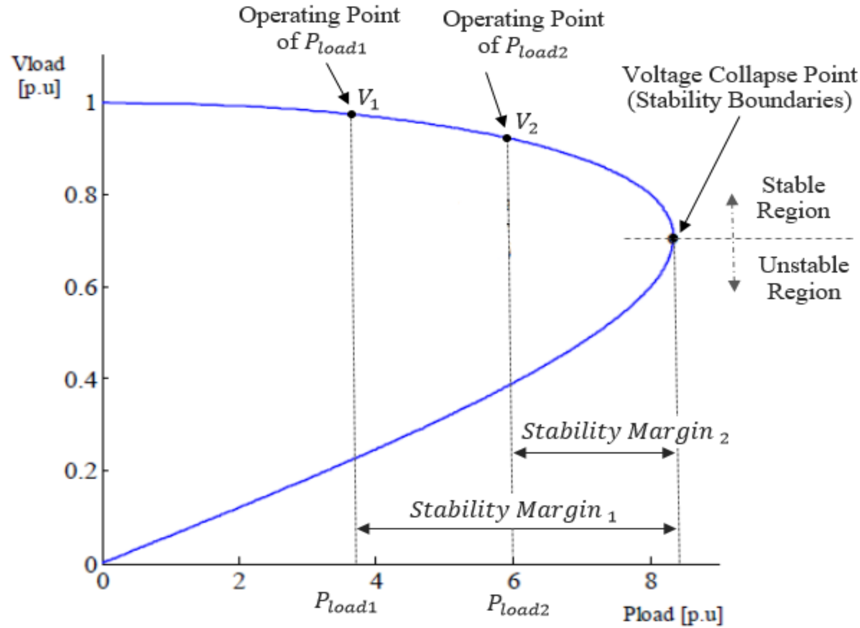


Figure 29-13 منحنى الأنف

1- إحدى هاتين القيمتين (القيمة العلوية) تمثل نقطة التشغيل الطبيعية ، والجهد عندها ينخفض بزيادة التحميل ولكن بانخفاض طفيف مالم تتواصل الزيادة فى التحميل حتى يصل إلى جهد الانهيار ، حيث تتحرك هذه النقطة يمينا مع تزايد التحميل فيتناقص فى نفس الوقت ما يسمى بـحد الاتزان أو Stability Margin كما هو واضح فى الشكل عند المقارنة بين نقطتى تشغيل Load1 و Load2 .

بمعنى أنه كلما كانت نقطة التشغيل بعيدة عن نقطة الانهيار كلما زاد ما يعرف بالـ Stability Margin

1- وأما (القيمة السفلى) فغير مقبولة وتعتبر Unstable لأنها صغيرة جدا مقارنة بالقيمة الطبيعية ، و لو حدث ووصلت نقطة التشغيل – لو لحظيا – لهذه القيمة فسينهار النظام فورا بسبب تتابع و تزايد الانهيار الناتج عن تجاوز حد الاتزان حتى نصل إلى مرحلة الـ Voltage Collapse ويصل الجهد إلى قيمة تساوى صفر. والسبب فى ذلك أن أى قيمة على الجزء السفلى من المنحنى هى قيمة منخفضة جدا ويترتب على انخفاض قيمتها أن الحمل يسحب تيارا شديد الارتفاع (دائما نفترض ثبات القدرة) وهذا سيؤدى إلى مزيد من الانخفاض للجهد بسبب الـ Voltage drop الهائل الذى سينتج من التيار ومن ثم ندخل فى دوامة تنتهى بنا إلى قيمة جهد = صفر كما فى الشكل.

2- معنى أن الجهد يساوى صفر أن لدينا وضع يشبه حالة الـ Short Circuit دون أن يكون لدينا Short Circuit ، فالجهد غالبا لايساوى صفرا إلا إذا اتصل الموصل بالأرض فى حالة القصر، ولكن هذه إحدى مظاهر خطورة ظاهرة عدم اتزان الجهد أن نصل إلى وضع كارثى كما فى حالة الـ SC دون أن يحدث SC حقيقى.

29.12 تأثر الجهد بتغير القدرة غير الفعالة

من المعادلة السابقة وصلنا إلى أن

$$V_R = \sqrt{\frac{{V_S}^2}{2} - Q_L X_L \pm \sqrt{\frac{{V_S}^4}{4} - {X_L}^2 {P_L}^2 - X_L {V_S}^2 Q_L}}$$

يمكن من هذه العلاقة رسم المنحنى الممثل للعلاقة بين الـ V_R وبين الـ Q كما فى الشكل 29-14

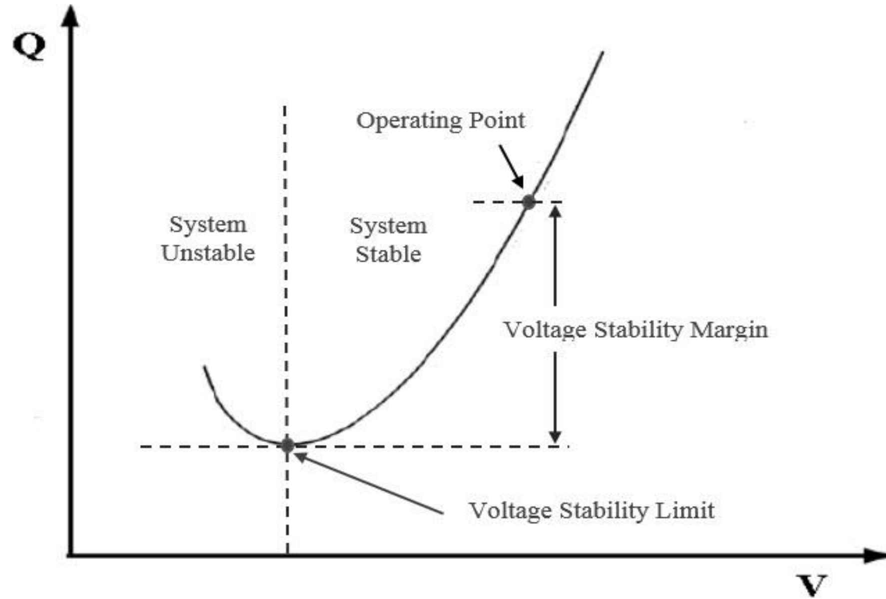


Figure 29-14 Q-V curve

والذى يتضح منه أن حدوث أى انخفاض فى قيم الـ Q المتاحة من المصدر سيصاحبه انخفاض فى قيمة الجهد الواصل للأحمال يمكن أن تتسبب فى حدوث .Voltage collapse أيضا.

أما المنحنى فى الشكل 29-15 فيمثل عدة مستويات للتحميل وتظهر فيها العلاقة السابقة بين الجهد وبين الـ Q المتاحة من المصدر ، ومنها يتبين أن الجهد يرتفع بارتفاع قيمة الـ Q المتاحة من المصدر ، وينخفض بانخفاضها عند ثبات قيمة الـ P ، وأن المشكلة دائما تكمن فى حدوث انخفاض حرج لـ Q المتاحة من المصدر أى عدم قدرة الـ Supply على توفير الـ Q المطلوبة مع ثبات القدرة الفعالة المسحوبة ، عندها سيحدث حتما انهيار للجهد Voltage Collapse . قارن ذلك بمنحنيات العلاقة بين الـ Active Power والجهد السابقة والتى رأينا فيها أن الانهيار للجهد يحدث مع الارتفاع فى التحميل لـ P .

والواقع أن أغلب حالات انهيار الجهد تحدث حين تفشل المنظومة فى توفير الـ Q الكافية للأحمال المركبة على الشبكة ، ومن ثم فنحن نخشى دائما من حدوث أى ارتفاع فى قيمة الـ P المطلوبة أو حدوث أى انخفاض فى قيمة الـ Q المتاحة فى الشبكة.

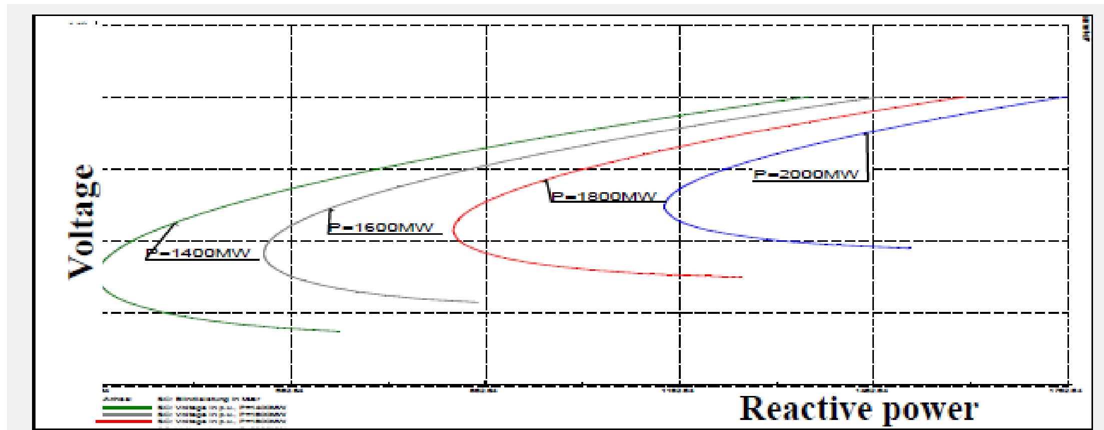


Figure 29-15 Q-V curves under different loads

والشكل 29-16 يلخص دور الـ Q التى نتحكم فيها بواسطة المكثفات C أو الملفات L من أجل التحكم فى تثبيت قيمة الجهد V .

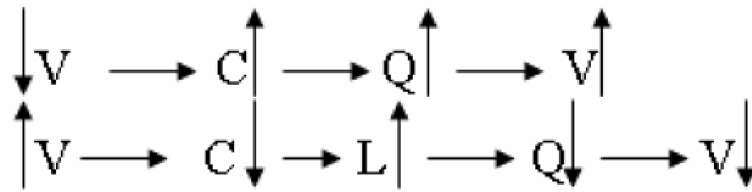


Figure 29-16

والمعادلة السابقة لها صورة مبسطة كالتالي :

$$V_r = \frac{V_s - \sqrt{V_s^2 - 4.X_1.Q_r}}{2}$$

حيث $Q_r = Q_S - Q_L$

ومنها يمكن استنباط عدة مفاهيم:

1- إذا كانت $Q_L = Q_S$ عندها تكون $Q_r = 0$ وتصبح $Vs = Vr$

2- إذا كانت $Q_L > Q_S$ عندها تكون $Q_r = +$ وتصبح $Vs > Vr$

3- إذا كانت $Q_L < Q_S$ عندها تكون $Q_r = -$ وتصبح $Vs < Vr$

- الحالة الأولى تمثل الوضع النموذجي
- الحالة الثانية تمثل حالة أن المطلوب أكثر من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء النهار ويترتب عليه حدوث Voltage Dip
- الحالة الثالثة تمثل حالة أن المطلوب أقل من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء الليل ويترتب عليه حدوث Ferranti Effect أى ارتفاع الجهد عند الحمل ويصبح أعلى من الجهد عند المصدر.

ومن ثم يتضح تأثير قيمة الـ Q على ثبات قيمة والجهد وتغيرها فى الشبكات

29.13 العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد (عدم اتزانه)

هناك عدة أسباب تؤدى لحدوث هذه الظاهرة أهمها بالطبع زيادة الأحمال كما سبق شرحه. ومن الأسباب الأخرى:

1- تغير قيمة X_{line} المكافئة الواصلة بين الSource وبين الـ Load وذلك قد يحدث نتيجة فتح مفاجئ مثلا لأحد الخطوط بينهما فتزيد القيمة المكافئة لـ X ومن ثم فإن مساحة منحنى P-V ستقل (الخط المنقط فى الشكل 29-17) وهذا يعنى كما هو واضح فى الشكل أن الـ Stability Limit قد صار أصغر واحتمالية اقتراب نقطة التشغيل من حد الاستقرار تزداد.

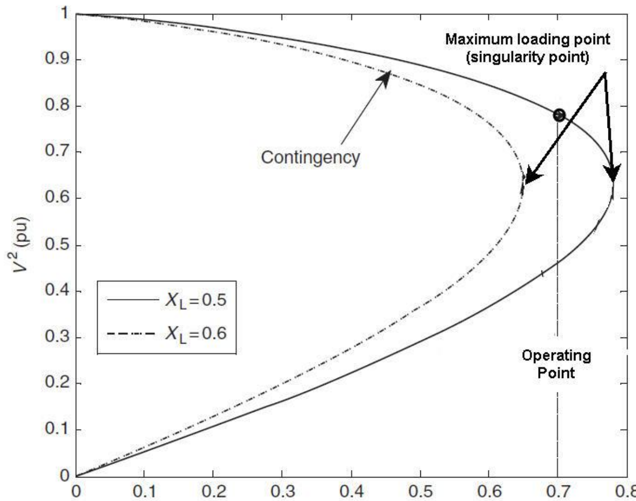


Figure 29-17

2- ومن الظواهر التى قد تؤدى لانهيار الجهد تزامن حدوث Starting لعدد كبير من المحركات الحثية فى نفس الوقت ، وهذا يعنى سحب تيار بدء عالى جدا ويتسبب ذلك فى انخفاض جهد الشبكة بسبب الـ Voltage drop . وهذه المحركات تصنف ضمن معدات Constant Power Devices بمعنى

أن انخفاض الجهد عليها يصاحب بارتفاع التيار (P= V . I) وهذا يعنى تفاقم المشكلة بسبب تزايد قيمة التيار المسحوب وربما وصلنا لحد الانهيار.

3- ومن الظواهر التى تساعد فى تسارع انهيار الجهد انخفاض قيمة معامل القدرة للأحمال المركبة. و المنحنيات التالية تبين مدى تأثر الـ Stability Margin بتغير قيمة الـ PF لارتباط ذلك بقيمة القدرة غير الفعالة المسحوبة للأحمال. وهذا يحتاج لشئ من الشرح كما فى الجزء التالي.

29.13.1 ملحوظات على استقرار الجهد

2- منحنى الـ Nose Curve يمكن اعادة رسمه مع قيم مختلفة لمعامل القدرة كما فى الشكل 29-18 حيث نلاحظ أن الوضع يزداد سوءا كلما انخفض معامل القدرة فيصبح مدى الاستقرار Stability Limit أصغر بينما يتحسن مع Leading PF وهذا له علاقة بالجزئية الخاصة بعلاقة الجهد مع القدرة غير الفعالة كما سنرى لاحقا حيث تركب المكثفات على التوازى لرفع قيم الجهد.

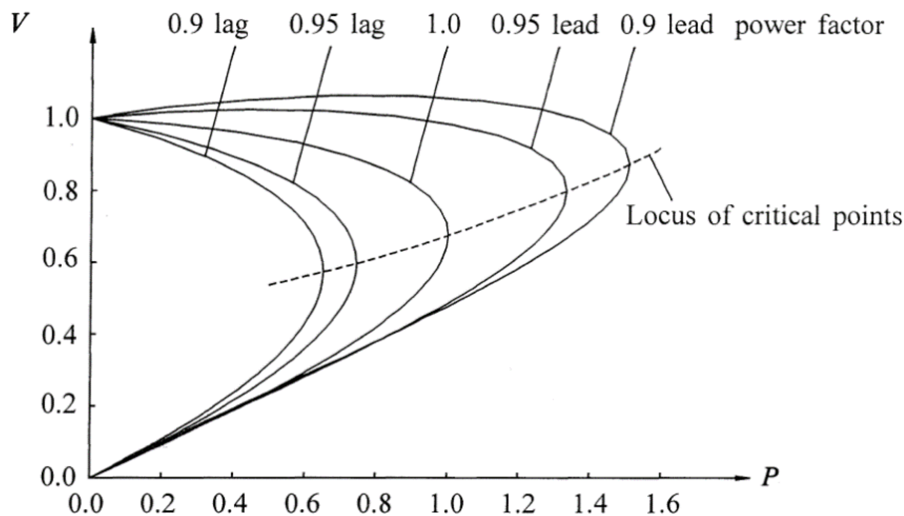


Figure 29-18 تأثير معامل القدرة

3- أحد الأسباب الرئيسية لهذه الظاهرة هو ارتفاع الأحمال حتى تجاوزت قيمة أقصى قدرة يمكن نقلها على الخط ، وهو ما يؤدى إلى انتقالنا للعمل على الجزء السفلى من منحنى نقل القدرة.

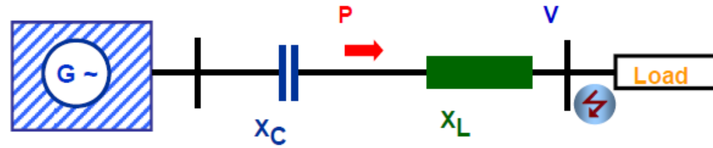
4- ومن الأسباب الرئيسية أيضا أن أى انخفاض فى الجهد سيؤدى إلى زيادة سحب القدرة غير الفعالة وهو ما يؤدى إلى مزيد من الانخفاض فى الجهد وربما نصل لحافة منحنى الـ Noze Curve سريعا وندخل إلى الجزء السفلى من المنحنى ومن ثم نتجه مباشرة إلى انهيار الجهد .

29.14 طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات

29.14.1 أولا فى شبكات الجهد العالى :

1. تغيير التغذية الخاصة بالـ Exciter لوحدات التوليد الموجودة بالخدمة مما يؤدي إلى زيادة أو نقصان القدرة الغير فعالة المولدة.
2. فصل وتوصيل الـ Reactors على الشبكة جهد 500 ك.ف (توجد فى مصر سبع ممانعات سعة 165 ميجا فار / وحدة) : وحدتان بالسد العالى – وحدتان بنجع حمادى – ثلاث وحدات في سمالوط).
3. تشغيل المكثفات المتزامنة (كما فى محطة محولات القاهرة 500 ك.ف حيث توجد 3 وحدات سعة 65 ميجا فار / وحدة)
4. ضبط مغيرات الجهد في محطات محولات 500/ 220 – 66/220 ك.ف
5. يستعمل مغير الجهد Tap Changer لرفع وخفض الجهد في المحولات جهد 11/66ك.ف
6. استخدام الـ Series Capacitive Compensation كما فى المخطط شكل 29-19.

لاحظ فى الـ P-Q Curve الخاص بالمولد أن إضافة أى Q جديدة ستساعد فى تغذية P إضافية جديدة عند نفس معامل القدرة.



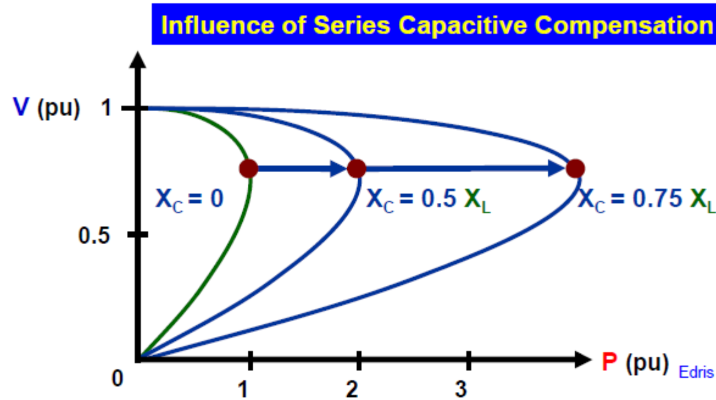


Figure 29-19 Series Compensation

7. اســتخدام أدوات تســاعد فى عمل Dynamic Voltage support عن طريق اســتخدام Dynamic Reactive Power Support ، والنتيجة واضحة فى الشكل 29-20.

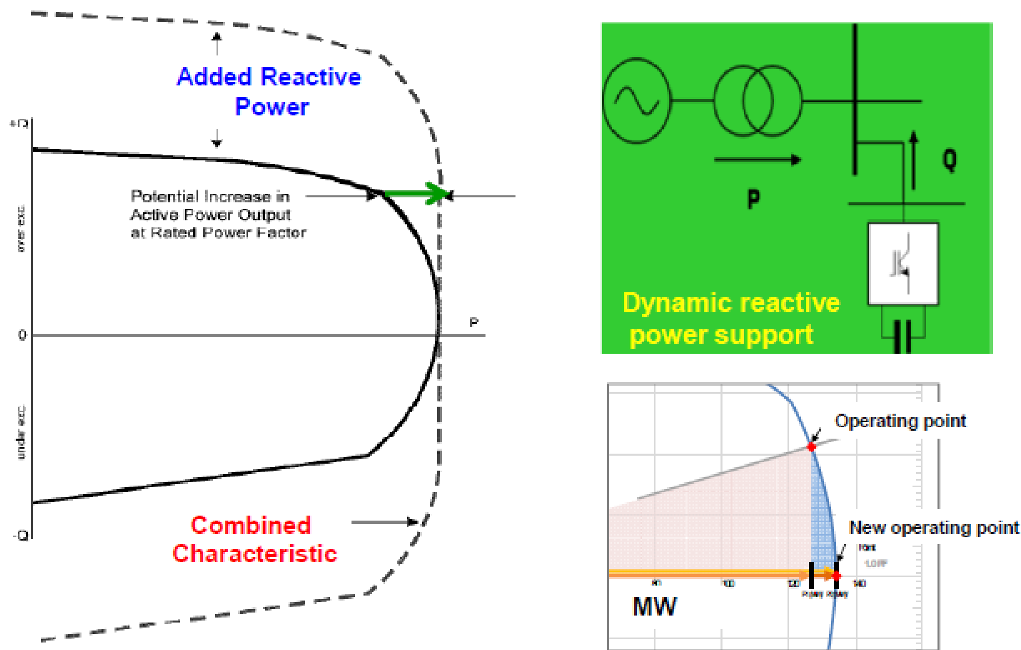


Figure 29-20

29.14.2 ثانيا : فى الجهد المتوسط والمنخفض

ويتم هنا بعدة طرق منها :

1- استخدام المكثفات الثابتة :

تســتخدم وحدة أو أكثر من المكثفات ، ويتم توصــيلها بطريق مباشــرة ومســتديمة على قضــبان التوزيع الرئيســية لتعطى مستوى ثابت من تعويض القدرة الغير فعالة.

2- استخدام بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية :

وتســتخدم في معظم الأماكن حيث يكون معدل التغير في كل من القدرة الفعالة والغير فعالة كبيرا نســبيا نتيجة لتغير الأحمال ويكون استخدام المكثفات الثابتة أوفر اقتصاديا وأبسط فنيا من بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية .

غير أن تحديد اســتخدام أي من الطريقتين الســابقتين وتفادى إحتمال حدوث مشــاكل عند توصــيل مكثفات على الشبكة مع عدم وجود أحمال يتوقف على كل من قدرة محول التوزيع وقدرة المكثفات طبقا للقاعدة الآتية :

$15\% \geq Q_C / S_n$: يمكن استخدام المكثفات الثابتة

تستخدم بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية ، حيث: $15\% < Q_C / S_n$:

Q_C : قدرة المكثفات (ك فار)

S_n: قدرة محول التوزيع (ك.ف.أ)

مكونات بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية :

تقسم القدرة الكلية لبطارية المكثفات على مجموعة من الخطوات (عادة 6 أو 12 خطوة) بحيث يتم إدخال العدد المناسب من الخطوات لتغطية احتياج الأحمال من القدرة الغير الفعالة بدون زيادة أو نقصان وتتكون كل خطوة من المكونات التالية:

- وحدة مكثفات ثلاثية الطور موصله بطريقة (دلتا)
- "كونتاكتور" من نوع خاص لتعشيق وفصل المكثفات
- مصهرات ذات سعه قطع عالية (HRC) أو قواطع تيار لحماية وحدة المكثفات .
- منظم أوتوماتيكي (Regulator) لمعامل القدرة .. يقوم بالتحكم في خطوات المكثفات بإدخال العدد المناسب منها طبقا لتغير الأحمال للوصول إلى معامل القدرة المطلوب بصفه دائمة .
- محول تيار (CT) يتم وضعه عند خرج المحول التوزيع مباشرة لقياس قيمة التيار المسحوب وتغذية المنظم الأوتوماتيكي بإشارة تيار تتناسب مع تيار الحمل.

3- <u>استخدام وحدات التوليد الموزعة DG</u>

وحديثا اضيفت طريقة ثالثة لتحسين اتزان الجهد بالشبكة وذلك بإضافة ما يسمى بالـ Distributed Generation, DG وهى مولدات (غالبا تعمل على إحدى أنواع مصادر الطاقة الجديدة مثل الطاقة الشمسية أو الرياح) لكنها تدخل فى مرحلة التوزيع وليس فى مرحلة التوليد كما فى نظم القوى الكهربية التقليدية والتى تتكون عادة من ثلاثة مراحل هى التوليد ثم النقل ثم التوزيع. أما فى هذا النظام الجديد DG فإن المولدات تدخل فى المرحلة الأخيرة (مرحلة التوزيع) لتحقق عددا من المكاسب من أهمها أن تكون بالقرب من الأحمال فتقل القدرة المفقودة فى الخطوط.

وأيضا لتساهم بكفاءة فى تحسين اتزان الجهد بالشبكة كما سنرى من المنحنى شكل 29-21 الذى يمثل نفس منحنى الـ Nose Curve السابق لكن فى وجود وعدم وجود الـ DG ومنه يتبين أن الـ Stability Margin زادت وبالتالي تحسن استقرار النظام .

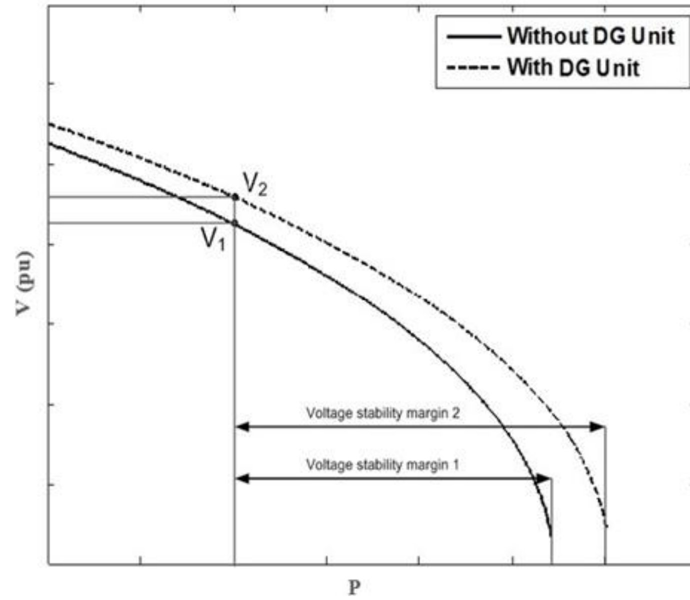


Figure 299-29-6

4- فصل الأحمال.

إذا لم يتيسر شئ من الطرق السابقة فلن يكون هناك حل للمحافظة على استقرار الجهد مع تزايد الأحمال واقتراب نقطة التشغيل من حافة الـ Nose Curve سوى بفصل بعض الأحمال أو ما يعرف بالـ Load Shedding

5- إعادة توزيع الأحمال

هناك حل خامس لكنه حل على المدى البطئ وفكرته هو إعادة توزيع الأحمال داخل الشبكة لتقليل الضغط على الموزعات أو المحولات المحملة بشدة ، وهو ما يسمى بالـ Network Reconstruction أو Network Reconfiguration.

6- حلول أخرى

بالطبع هناك حلول أخرى مثل عمل خليط بين حلين أو ثلاثة من الحلول السابقة معا كأن نستخدم DG مع مكثفات مثلا.

الخلاصة:

مما سبق يمكن أن نخلص إلى أن من أهم وسائل تجنب ظاهرة عدم اتزان الجهد ما يلى:

1- تحسين معامل القدرة للأحمال
2- تركيب مكثفات ثابتة ومتغيرة فى شبكات التوزيع بغرض الوصول لتحسين الـ Stability Limit وليس مجرد تحسين معامل القدرة وهذا يستلزم استخدام الـ Optimization Techniques لتحديد أفضل الأماكن وأدق القيم لهذه المكثفات
3- التوسع فى استخدام الـ VAR Compensators وتعنى معوضات القدرة غير الفعالة وهى أشكال عديدة ويمكن الرجوع لموضوع القدرة غير الفعالة بهذا الكتاب (الباب الثانى) للمزيد حول هذه النقطة خاصة أنها تساهم بشكل فعال جدا فى تحسن ثبات الجهد عند حدوث اهتزازات قوية Dynamic Stability.

30

التوافقيات فى الشبكات الكهربية

HARMONICS

معلوم أن المولدات تقوم فى الأحوال العادية بإنتاج voltage signals على صورة sin wave بتردد ثابت. ويتم توصيل الأحمال لهذه المولدات عبر خطوط لنقل الطاقة تصل بين المولد والحمل ، ثم عند إغلاق الدائرة يمر تيار إلى الحمل تتوقف شدته على قيمة الجهد وقيمة مقاومة الحمل كما هو معلوم طبقا لقانون أوم. ويكون شكل موجة التيار فى هذه الحالة تشبه تماما موجة الجهد وتختلف فقط فى القيمة . وحتى لو كان الحمل مكونا من مقاومات وملفات فستظل شكل موجة التيار على شكل sin wave مثل الجهد مع اختلاف فى الـ Phase angle .

وكل ما سبق صحيح بشرط أن يكون الحمل من النوع الـ Linear Load ، حيث تزيد قيمة التيار أو تقل مع تغير قيمة معاوقة الحمل بمعدلات ثابتة.

ثم بدأت مشاكل التوافقيات فى الظهور مع انتشار non-linear loads ، ومع التوسع فى استخدام أجهزة الكترونيات القوى Power Electronocs, PE فى مغيرات السرعة للمحركات الكهربية Speed Drives ، وكذلك استخدام الأجهزة الإلكترونية التى تحتاج إلى DC supply تحصل عليه من أجهزة switching power supplies ، واستخدام لمبات الفلوريسنت ذات البالست الالكترونى فى الإضاءة . كل هذا أدى الى واقع جديد مختلف عما سبق ، حيث تسببت هذه الأحمال و هذه الأجهزة فى ظهور ترددات جديدة فى موجة الجهد والتيار لم تكن موجودة فى الأصل ، وهذه الترددات الجديدة هى التى نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonocs .

30.1 ماهى الـ HARMONICS وكيف تنشأ ؟

فى العقود الأخيرة ظهرت أنواع جديدة من الأحمال لا تتغير قيمة التيار خلالها بوتيرة ثابتة ومحددة ، أو بمعنى آخر لا تتبع قانون أوم ، وبأسلوب آخر نقول أن هذه الأحمال الجديدة إذا وضعت عليه جهد على شكل sin wave فليس بالضرورة أن يمر خلالها تيار له نفس الشكل ومن هنا سميت هذه الأحمال بأحمال الـ Non-linear أو أحمال غير خطية . فإذا علمنا أن أكثر من 50% من الأحمال المنزلية وبنسبة أكبر فى الأحمال الصناعية الآن تصنف على أنها non linear loads فهذا يعطى مؤشرا لخطورة هذا الموضوع.

على سبيل المثال ظهرت دوائر توحيد التيار المتردد rectifier circuits التى تدخل عليها pure sin ويخرج منها إلى الحمل تيار بأشكال مختلفة حسب نوع العنصر المستخدم فى الدائرة وهل هو مثلا دايود واحد أم Bridge أم ثايرستور SCR. لاحظ مثلا فى الشكل 30-1 الاختلاف الكبير بين شكل الجهد فى الـ Input وشكله فى الـ Output علما بأن شكل التيار المار فى الحمل (المقاومة) سيأخذ نفس شكل Output Voltage لأن الحمل مقاومات كما هو معلوم من أساسيات الـ Phasor Diagrams .

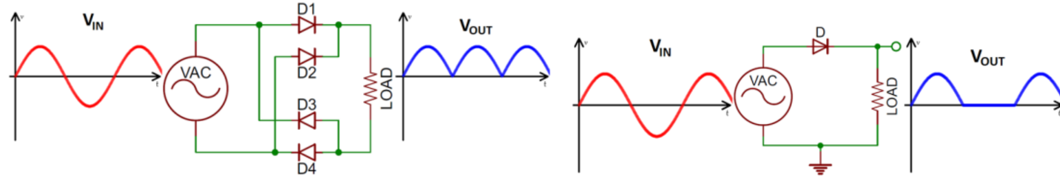


Figure 300-30-1 دوائر التوحيد بالديود

وقد يتشوه التيار بصورة أكبر إذا كانت الـ Rectifier circuits تعتمد على عنصر الـ SCR كما فى الشكل 30-2 الذى تظهر فيه إشارة جهد الدخول كـ Pure sin بينما التيار (الجزء المظلل) مختلف فى الشكل تماما.

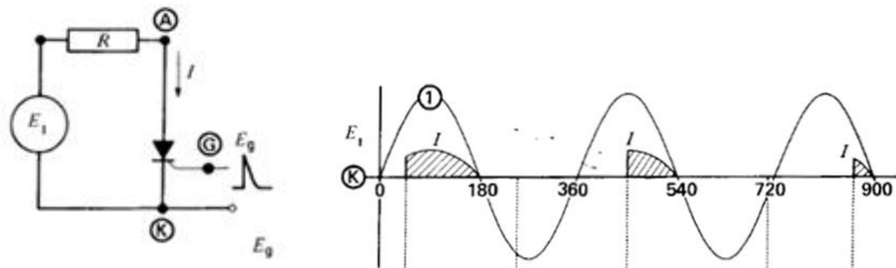


Figure 300-30-2 SCR Rectifier

هذه التوافقيات لا يقتصر تأثيرها فقط على مجرد تشوه شكل الموجة ، بل سيتعدى ذلك إلى سخونة المعدات واضطراب فى العمل وربما تدمير لبعض الأجهزة كما سنرى ذلك تفصيلا فى هذا الباب.

ونشير هنا إلى أن التوافقيات كانت موجودة حتى قبل ظهور هذه النوعية من الأحمال أو الأجهزة ، فقد كانت موجودة وإن كان ذلك بنسبة ضئيلة فى الجهود الناتجة من المولدات ، وكانت أيضا موجودة بنسب بسيطة بسبب محولات القوى فى الشبكة ، لكن الظهور الأقوى للتوافقيات كان بعد انتشار الأحمال غير الخطية وأجهزة الـ PE.

30.1.1 طبيعة التوافقيات


Figure 300-30-3

تبين من خلال استخدام أجهزة تحليل الموجات Spectrum Analyzer المعتمدة على نظرية Fourier Transform (شكل 30-3) أن موجة التيار لم تعد تشتمل على تردد الـ 50Hz فقط كما كان فى حالة الأحمال الخطية ، بل أصبحت تتكون من عدد من الترددات من مضاعفات الـ 50Hz، وهذه الترددات الجديدة – الغير موجودة أصلا فى موجة مصدر التغذية (جهد الدخول) – هى التى نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonics .

ويتم تقسيم التوافقيات إلى توافقيات ذات رتبة فردية (H3، H7، H5) وتوافقيات ذات الرتبة الزوجية (H2،H4،H6). والتوافقيات الفردية هى الأكثر شيوعا فى الشبكات الكهربية ، ويكون تردد التوافقية هو حاصل ضرب رتبتها فى 50 بمعنى أن تردد التوافقية الخامسة مثلا يساوى 5 فى 50 أى يساوى 250Hz .

والسبب فى عدم انتشار التوافقيات الزوجية الـ Even harmonics هو أن معظم الأحمال الإلكترونية لها half symmetrical wave ، مثل منحنى الـ Sin ، وبالتالى تسحب فقط ترددات من الفئة الفردية ، بينما الترددات من الفئة الزوجية تحتاج لوجود أحمال تسحب Full symmetrical waveforms وهى غير شائعة.

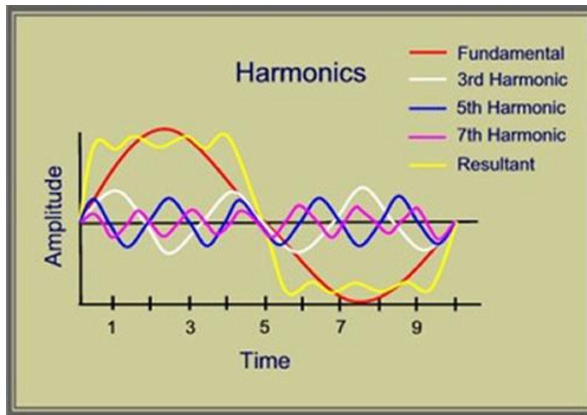


Figure 300-30-4 التوافقيات

والشكل 30-4 يظهر نموذجا لبعض التوافقيات مقارنة بالتردد الأصلى الذى يسمى Fundamental حيث تظهر

الـ 150 Hz (Third Harmonic)

250 Hz (Fifth Harmonic)

350 Hz (seventh Harmonic)

كما تظهر الموجة المشوهة المحصلة Resultant الناتجة عن جمع كل هذه التوافقيات معا.

وبعض الأجهزة تعطى نتائج التحليل على شكل نسب مئوية لقيمة الـ Spectrum المختلفة كما فى الشكل 30-5.

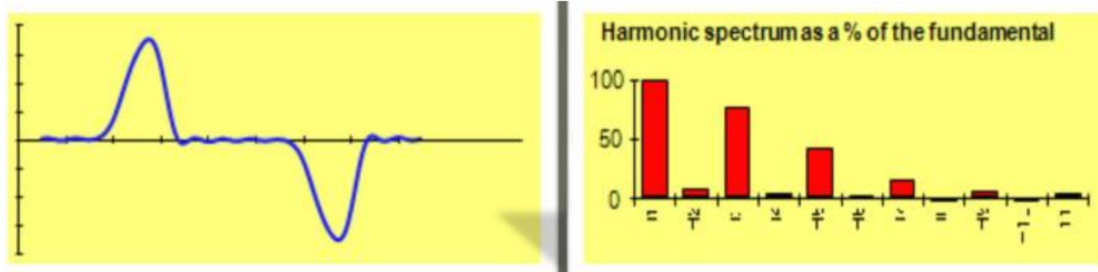


Figure 300-30-5 تحليل الموجة

مع ملاحظة أننا إذا قمنا بجمع الترددات المنفردة سواء رياضيا أو بالرسم فسنحصل مرة أخرى على الموجة المشوهة الأصلية كما فى المعادلة والشكل 30-6.

$$I_{rms} = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h3}^2 + I_{h5}^2 + \ldots + I_{hn}^2}$$

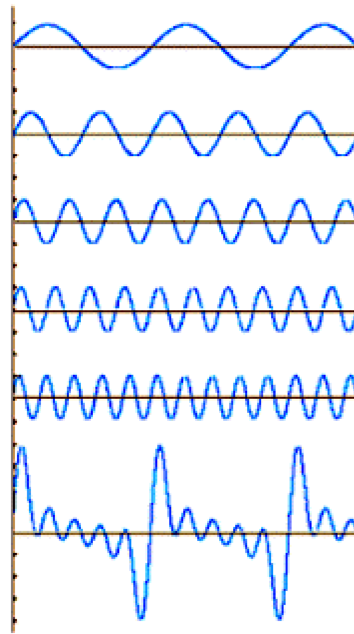


Figure 300-6

30.1.2 لماذا تختلف الـ Harmonics فى إشارتى الجهد والتيار لنفس الحمل؟

نستنتج مما سبق أن الـ Harmonics تتولد بسبب الأحمال الغير خطية أو الأحمال التى تستخدم أجهزة PE ، فهذه الأحمال تسحب تيارا من المصدر بتردد مختلف عن تردد الشبكة الأساسي (50Hz) ، وهذا التيار المتجه من المصدر إلى الحمل الغير خطى يمر خلال معاوقات الخطوط الواصلة من الحمل للمصدر فينشأ عن مروره

جهودا بترددات مختلفة عن الـ 50Hz ، وتجمع هذه الجهود الجديدة على الجهد الأصلى عند كل نقط فينشأ جهودا جديدة مشوهة لأنها نتاج جمع جهود ذات ترددات مختلفة كما فى المثال التالي فى الشكل 30-7.

فى البداية إذا تم تشغيل الحمل L3 فقط وهو Linear Load فسيمر تيار بالدائرة يشبه تماما إشارة الجهد ولن تتأثر لا شكل ولا قيمة إشارة الجهد على الـ BBs المختلفة اللهم إلا بقدر الـ Voltage drop .

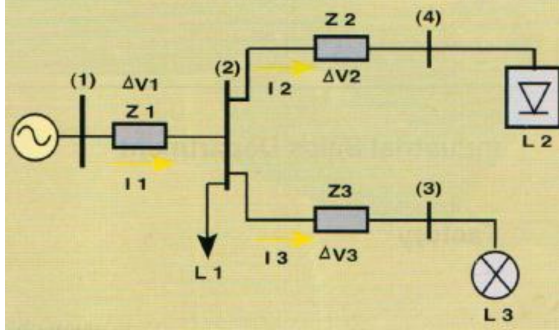


Figure 300-7

لكن بمجرد تشغيل الحمل L2 وهو من النوع الـ Non Linear فسيسحب تيارا مشوها ، وينشأ هبوط فى الجهد قدرة $\Delta V2 = I2 \times Z2$ وأيضا ينشأ جهدا يساوى $\Delta V1 = I1 \times Z1$.

وبإضافة هذه القيم بإشارتها على قيم الجهود الأصلية سنكتشف أن الجهود على جميع الـ BBs أصبحت مشوهة وتزداد درجة التشوه كلما كانت قيم الـ Impedances, Z1, Z2 عالية بينما يكون التشوه محدودا إذا كانت الـ Z صغيرة.

ومن هنا نقول :

1- يتوقف وجود أثر التوافقيات فى إشارة الجهد على قيم معاوقة النظام والخطوط .وبالتالي ففى بعض الحالات قد تجد التوافقيات عالية فى إشارة التيار (لأنها أصلا تظهر فى التيار) بينما لا وجود لها فى إشارة الجهد بسبب انخفاض معاوقات الخطوط.

2- أن الشبكات التى لها Short circuit Capacity مرتفعة والتى تسمى Strong Grid (وهذا يعنى X_{grid} منخفضة) سيكون تأثير الـ Harmonics عليها محدودا لصغر قيمة (Z times I) والعكس صحيح. والشكل 30-8 يوضح أكثر هذه النقطة ، فرغم تشوه الجهد عند الحمل يظل الجهد عند المصدر غير مشوه.

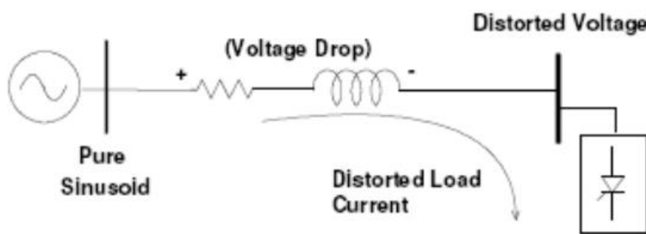


Figure 300-8

30.2 مصادر توليد الـ HARMONICS :

تعتبر الأجهزة التالية هى أهم مصادر توليد التوافقيات فى الشبكات:

1. أجهزة الـ PE ومصابيح الـ LED

2. مصابيح الفلورسنت
3. المعدات ذات القوس الكهربى
4. محولات القوى

30.2.1 أجهزة التى تستخدم معدات الـ Power Electronics :

مثل موحدات التيار Rectifiers وكذلك الـ Inverters ومغيرات السرعة Drives . هذه الأجهزة تنتج كما كبيرا من التوافقيات بسبب تغيير شكل الموجة الخارجة عن الموجة الداخلة . وبالرغم من أن تأثير كل جهاز الكترونى فى زيادة توافقيات الشبكة يعتبر صغيرا ، إلا أن كثرة عدد الأجهزة الإلكترونية تجعلها مصدرا مؤثرا للتوافقيات فى الشبكة .

ومن أشهر وأهم هذه الأجهزة أجهزة الـ 6−Pulse Converter ، وأجهزة الـ 12−Pulse converters لكثرة انتشارها فى أجهزة الـ UPS. حيث هذه الأجهزة يمكنها تحويل الـ DC إلى AC والعكس. كما فى الصورة شكل 30−9 التى تقارن بين الـ AC الناتجة من 6−pulse Inverter وبين الـ AC الناتجة من 12−pulse Inverter . لاحظ أيضا أنه كلما زادت عدد النبضات كلما كانت الموجة الناتجة أقرب للموجة الجيبية المرجوة وهذا يعنى أنها أقل فى التوافقيات.

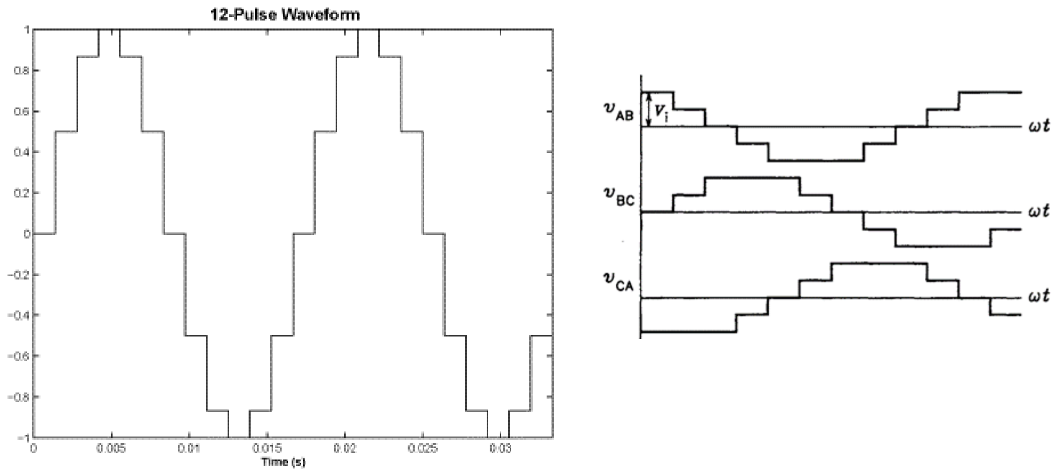


Figure 300-9

وهناك قاعدة تقول أن الـ Converter ذو p−pulse يولد توافقيات من الرتبة pk±1. حيث p عدد النبضات pulse ، و K التسلسل (1 ،2 ،3 ....)

وعلى هذا ، فهذه الأجهزة تسبب تشويه فى موجتى الجهد والتيار وأغلب التوافقيات الناتجة هو من الرتب الفردية طبقا للقاعدة السابقة . على سبيل المثال أجهزة الـ 6-Pulse ستولد توافقيات بأرقام تساوى 6k±1 أى يتولد التوافقيات الـ 5 و7 و11و 13 (لاحظ غياب مضاعفات التوافقية الثالثة).

أما النوع الثانى 12-Pulse فينتج توافقيات من رتب 12k±1 11و13و 23و25 وهكذا . وبالطبع مع ارتفاع رتبة التوافقية ستقل قيمتها بحيث يمكن إهمال التوافقيات الأعلى مثلا من 49 عادة. وهذا سبب آخر لتميز الـ 12-Pulse عن الـ 6-Pulse.

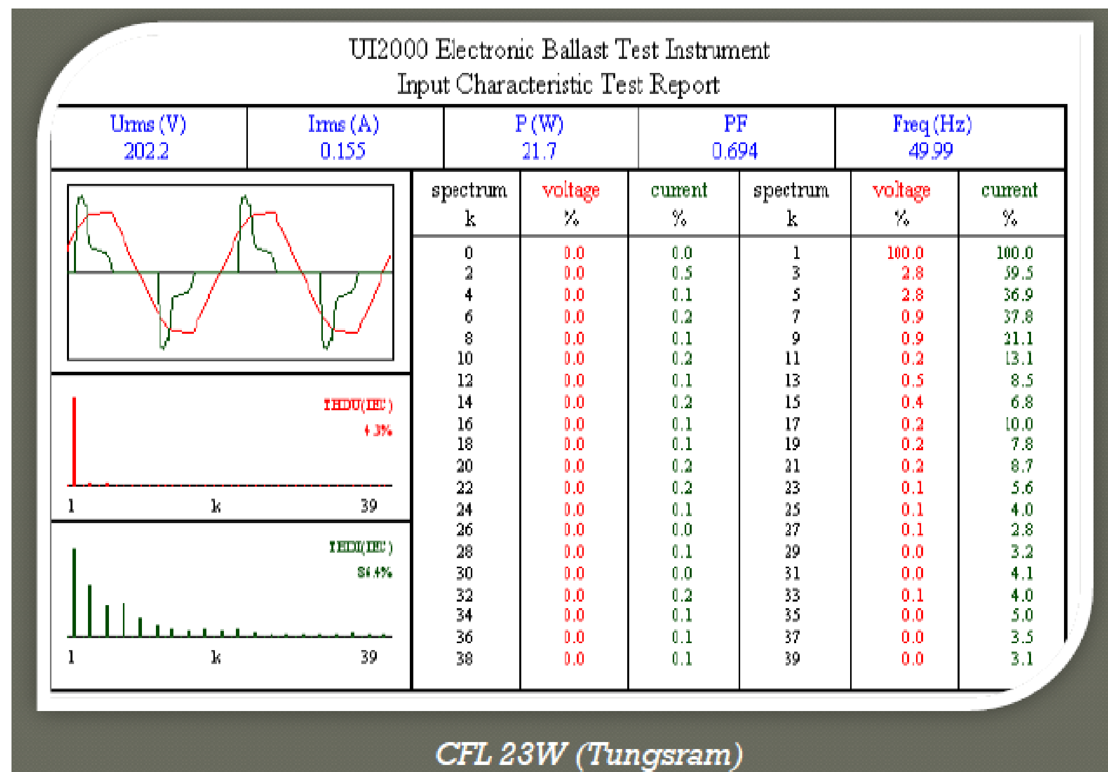
والأفضل من الاثنين السابقين استخدام الـ 18-pulse والذي ينتج التوافقيات (17 ، 19، 35 ، 37) ولكن مشكلته الوحيدة هو ارتفاع ثمنه لذا فهو نادر جدا في المكونات الكهربية بالشبكة المصرية.

30.2.2 مصابيح الفلورسنت:

تولد المصابيح قوسا كهربيا ويتولد عنها توافقيات من الدرجة الثالثة . ومن الخبرة العملية دلت على أن قيمة تيار التوافقيات فى هذه المصابيح قد تصل إلى 30%من قيمة تيار التردد الأساسى.

وفى الجداول التالية دراسة عن حجم وجود التوافقيات فى الجهد والتيار فى بعض أنواع اللمبات المعروفة باسم Compact Florescent Lamp CFL . وواضح من هذه الجداول ارتفاع قيمة التشوه بدرجة هائلة فى إشارات التيار فى النموذجين الأول والثانى وهذا متوقع لاسيما بعد أن تنظر لشكل إشارة التيار فى الرسم الموجود أقصى يسار الشكل.

Table 30-1



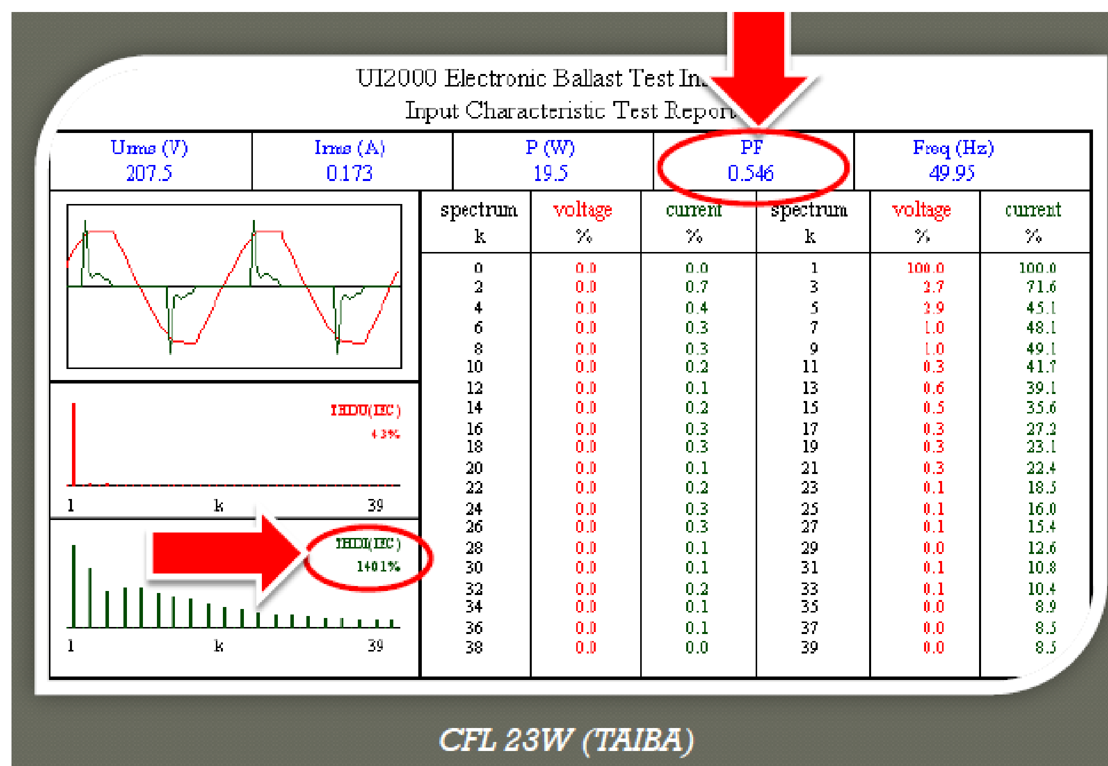
UI2000 Electronic Ballast Test Instrument
Input Characteristic Test Report

Urms (V)	Irms (A)	P (W)	PF	Freq (Hz)
202.2	0.155	21.7	0.694	49.99

spectrum k	voltage %	current %	spectrum k	voltage %	current %
0	0.0	0.0	1	100.0	100.0
2	0.0	0.5	3	2.8	39.5
4	0.0	0.1	5	2.8	36.9
6	0.0	0.2	7	0.9	37.8
8	0.0	0.1	9	0.9	21.1
10	0.0	0.2	11	0.2	13.1
12	0.0	0.1	13	0.5	8.5
14	0.0	0.2	15	0.4	6.8
16	0.0	0.1	17	0.2	10.0
18	0.0	0.1	19	0.2	7.8
20	0.0	0.2	21	0.2	8.7
22	0.0	0.2	23	0.1	5.6
24	0.0	0.1	25	0.1	4.0
26	0.0	0.0	27	0.1	2.8
28	0.0	0.1	29	0.0	3.2
30	0.0	0.0	31	0.0	4.1
32	0.0	0.2	33	0.1	4.0
34	0.0	0.1	35	0.0	5.0
36	0.0	0.1	37	0.0	3.5
38	0.0	0.1	39	0.0	3.1

CFL 23W (Tungsram)

Table 30-2



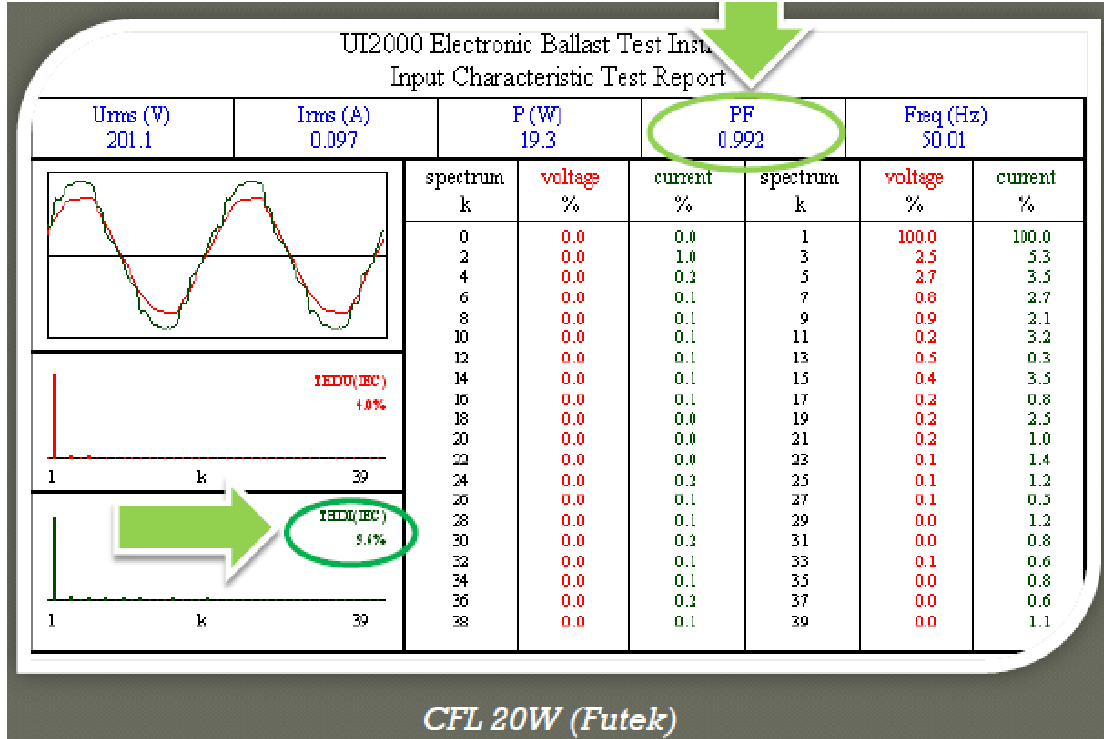
UI2000 Electronic Ballast Test In...
Input Characteristic Test Report

Urms (V)	Irms (A)	P (W)	PF	Freq (Hz)
207.5	0.173	19.5	0.546	49.95

spectrum k	voltage %	current %	spectrum k	voltage %	current %
0	0.0	0.0	1	100.0	100.0
2	0.0	0.7	3	2.7	71.6
4	0.0	0.4	5	2.9	45.1
6	0.0	0.3	7	1.0	48.1
8	0.0	0.3	9	1.0	49.1
10	0.0	0.2	11	0.3	41.7
12	0.0	0.1	13	0.6	39.1
14	0.0	0.2	15	0.5	35.6
16	0.0	0.3	17	0.3	27.2
18	0.0	0.3	19	0.3	23.1
20	0.0	0.1	21	0.3	22.4
22	0.0	0.2	23	0.1	18.5
24	0.0	0.3	25	0.1	16.0
26	0.0	0.3	27	0.1	15.4
28	0.0	0.1	29	0.0	12.6
30	0.0	0.1	31	0.1	10.8
32	0.0	0.2	33	0.1	10.4
34	0.0	0.1	35	0.0	8.9
36	0.0	0.1	37	0.0	8.5
38	0.0	0.0	39	0.0	8.5

CFL 23W (TAIBA)

Table 30-3



UI2000 Electronic Ballast Test Ins...
Input Characteristic Test Report

Urms (V)	Irms (A)	P (W)	PF	Freq (Hz)
201.1	0.097	19.3	0.992	50.01

spectrum k	voltage %	current %	spectrum k	voltage %	current %
0	0.0	0.0	1	100.0	100.0
2	0.0	1.0	3	2.5	5.3
4	0.0	0.2	5	2.7	3.5
6	0.0	0.1	7	0.8	2.7
8	0.0	0.1	9	0.9	2.1
10	0.0	0.1	11	0.2	3.2
12	0.0	0.1	13	0.5	0.3
14	0.0	0.1	15	0.4	3.5
16	0.0	0.1	17	0.2	0.8
18	0.0	0.0	19	0.2	2.5
20	0.0	0.0	21	0.2	1.0
22	0.0	0.0	23	0.1	1.4
24	0.0	0.2	25	0.1	1.2
26	0.0	0.1	27	0.1	0.5
28	0.0	0.1	29	0.0	1.2
30	0.0	0.2	31	0.0	0.8
32	0.0	0.1	33	0.1	0.6
34	0.0	0.1	35	0.0	0.8
36	0.0	0.2	37	0.0	0.6
38	0.0	0.1	39	0.0	1.1

CFL 20W (Futek)

ويمكن تقسيم هذا النوع من المصابيح إلى نوعين :

1. الأول ذو خصائص جيدة وله High Performance, HP ، كما في النموذج الثالث السابق ، وهذا النوع يتميز بأن THD له صغير جدا وفي الحدود المسموح بها طبقا ، وذلك حسب المواصفات الدولية رقم 2-3- IEC 61000 . وهذا النوع نادر جدا في السوق المصري ، وإن وجد فأسعاره مبالغ جدا فيها ، نتيجة تركيب نوع من الفلتر بهذا النوع من اللمبات لتنقية الموجة. ويصل THD فيه إلى 18% .
2. الثاني ذو خصائص سيئة (Low Performance, LP) كما في النموذجين الأول والثاني السابقين ، وهذا النوع تصل فيه THD إلى 100% ، وهو منتشر جدا بالسوق المصري للأسف لرخص سعره.

والشكل 30-10 يوضح شكل موجه التيار لكل من النوعين منفردين ومجتمعين.

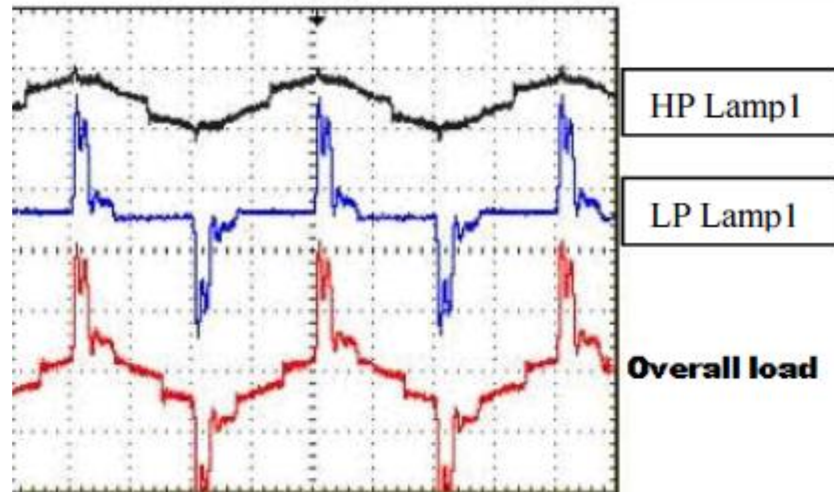
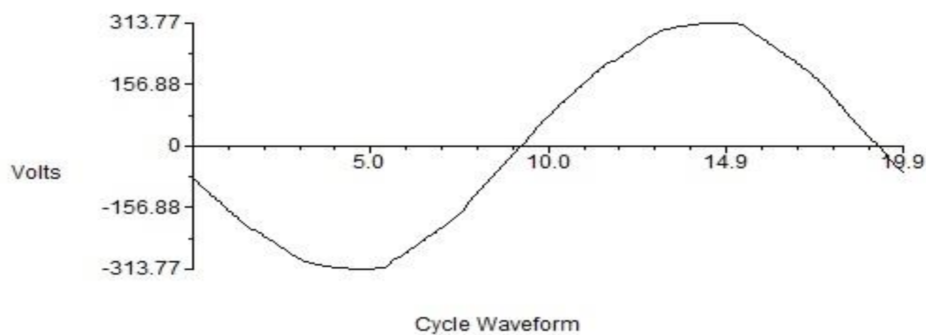


Figure 30-10 شكل موجات التيار فى نوعين من أنواع اللمبات الفلورسنت

وفيما يلى دراسة تفصيلية على لمبة CFL قدرتها 25 وات من النوع low performance (أجراها أحد الطلاب الذين أشرف عليهم بالماجستير) . وقد وجد لها الخصائص التالية :

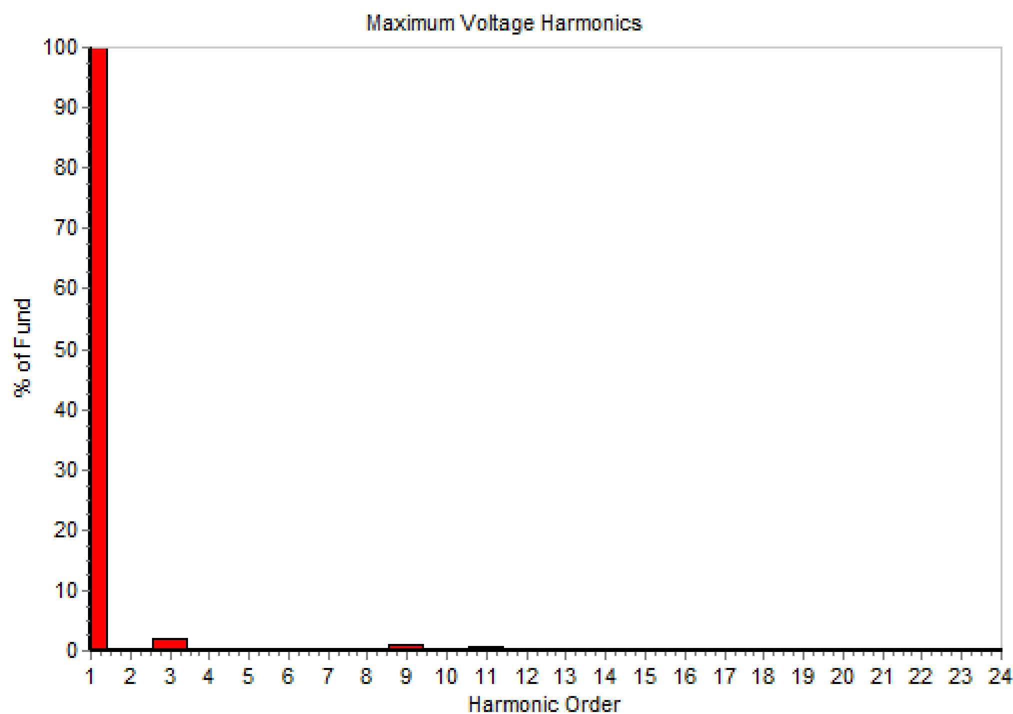
- القدره الفعلية (power) للمبة 22 وات
- التيار (current) 0.158 امبير
- معامل القدرة الحقيقي (يأخذ في الحسبان التوافقيات)(total power factor) 0.66 (lead)
- معامل القدرة الظاهري (displacement power factor) 0.92 (lead)

وبالقياسات وجد أن التوافقيات فى إشارة الجهد كانت في الحدود المسموح بها وشكل الموجه كما بالشكل التالي:

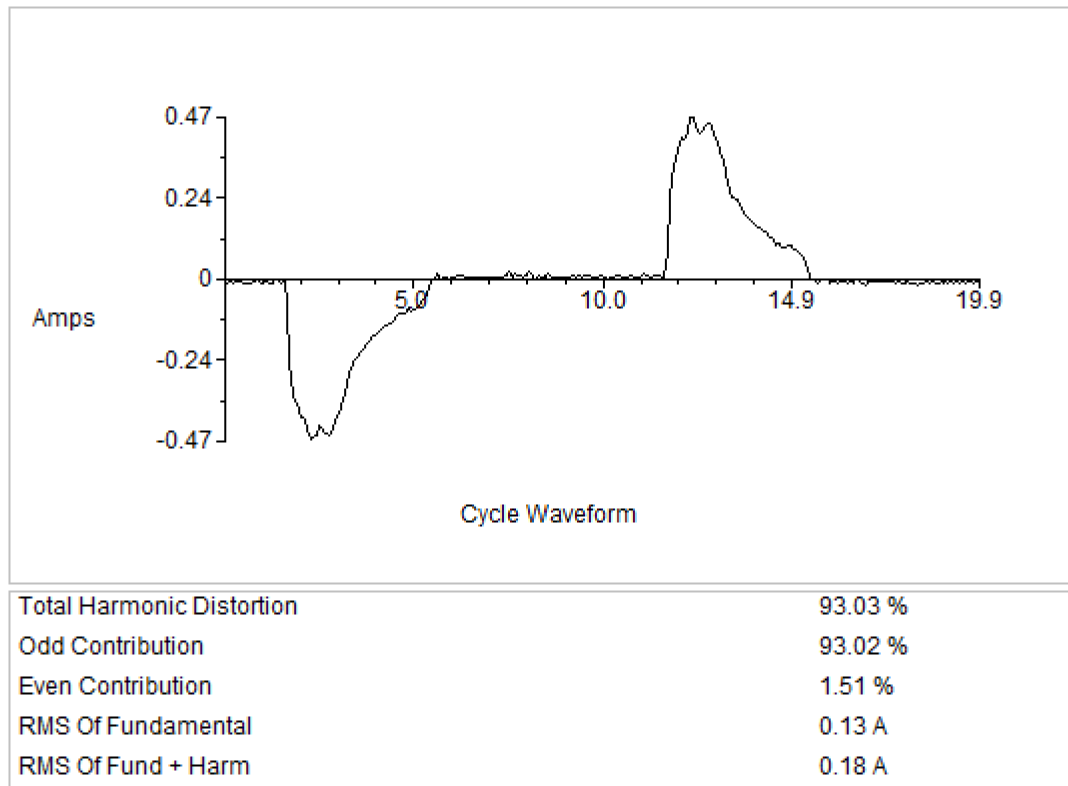


Total Harmonic Distortion	2.40 %
Odd Contribution	2.40 %
Even Contribution	0.08 %
RMS Of Fundamental	222.36 V
RMS Of Fund + Harm	222.42 V

Harm	% Of Fund	Volts	Angle	Harm	% Of Fund	Volts	Angle
Fund	100.00	222.4	0°	0	0.00	0.0	0°
3	2.03	4.5	93°	2	0.04	0.1	193°
5	0.33	0.7	342°	4	0.01	0.0	126°
7	0.32	0.7	53°	6	0.02	0.0	81°
9	0.95	2.1	182°	8	0.01	0.0	113°
11	0.52	1.2	340°	10	0.01	0.0	36°
13	0.18	0.4	299°	12	0.02	0.0	348°
15	0.25	0.6	233°	14	0.01	0.0	355°
17	0.15	0.3	80°	16	0.01	0.0	1°
19	0.12	0.3	201°	18	0.01	0.0	11°
21	0.20	0.4	312°	20	0.00	0.0	163°
23	0.04	0.1	214°	22	0.01	0.0	253°
25	0.10	0.2	235°	24	0.02	0.0	8°
27	0.15	0.3	13°	26	0.01	0.0	163°
29	0.02	0.0	200°	28	0.01	0.0	276°
31	0.09	0.2	233°	30	0.01	0.0	103°
33	0.05	0.1	104°	32	0.00	0.0	120°
35	0.03	0.1	216°	34	0.01	0.0	126°
37	0.10	0.2	325°	36	0.01	0.0	165°
39	0.01	0.0	131°	38	0.01	0.0	112°
41	0.04	0.1	196°	40	0.01	0.0	14°
43	0.01	0.0	310°	42	0.04	0.1	28°
45	0.02	0.0	159°	44	0.02	0.0	195°
47	0.05	0.1	295°	46	0.01	0.0	174°
49	0.02	0.0	220°	48	0.01	0.0	332°
51	0.03	0.1	146°	50	0.01	0.0	98°
53	0.03	0.1	26°	52	0.01	0.0	74°
55	0.01	0.0	156°	54	0.00	0.0	51°
57	0.01	0.0	263°	56	0.00	0.0	341°
59	0.01	0.0	54°	58	0.01	0.0	203°
61	0.03	0.1	154°	60	0.01	0.0	119°
63	0.01	0.0	61°	62	0.00	0.0	260°

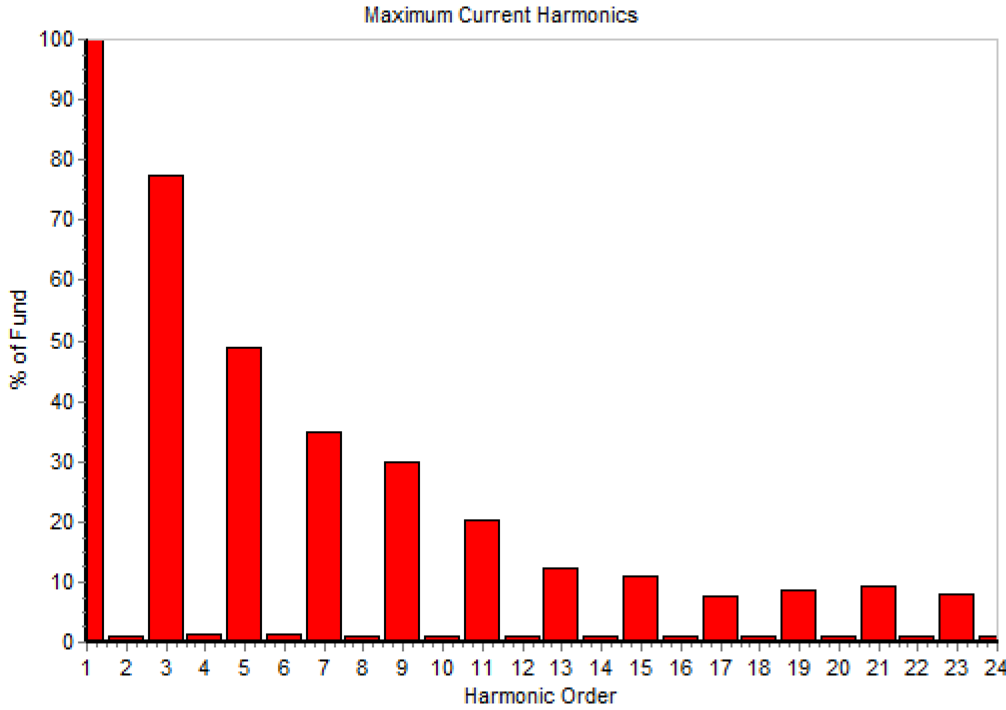


أما التوافقيات فى إشارة التيار فكانت كارثية كما هو متوقع و كما هو موضح بشكل الموجه التالي :



Total Harmonic Distortion	93.03 %
Odd Contribution	93.02 %
Even Contribution	1.51 %
RMS Of Fundamental	0.13 A
RMS Of Fund + Harm	0.18 A

Harm	% Of Fund	Amps	Angle	Harm	% Of Fund	Amps	Angle
Fund	100.00	0.1	0°	0	0.00	0.0	0°
3	71.89	0.1	175°	2	0.07	0.0	68°
5	40.76	0.1	11°	4	0.09	0.0	116°
7	29.32	0.0	225°	6	0.21	0.0	90°
9	22.72	0.0	64°	8	0.23	0.0	99°
11	10.57	0.0	270°	10	0.27	0.0	148°
13	7.45	0.0	153°	12	0.29	0.0	117°
15	6.14	0.0	12°	14	0.05	0.0	327°
17	4.93	0.0	269°	16	0.30	0.0	166°
19	7.83	0.0	118°	18	0.05	0.0	193°
21	6.04	0.0	312°	20	0.18	0.0	59°
23	4.23	0.0	184°	22	0.38	0.0	195°
25	4.64	0.0	33°	24	0.25	0.0	23°
27	2.30	0.0	229°	26	0.24	0.0	308°
29	2.17	0.0	169°	28	0.35	0.0	31°
31	2.78	0.0	12°	30	0.29	0.0	237°
33	2.71	0.0	246°	32	0.34	0.0	53°
35	3.05	0.0	94°	34	0.12	0.0	23°
37	2.50	0.0	309°	36	0.42	0.0	326°
39	2.31	0.0	180°	38	0.12	0.0	148°
41	2.83	0.0	26°	40	0.15	0.0	299°
43	2.31	0.0	246°	42	0.45	0.0	259°
45	2.41	0.0	103°	44	0.33	0.0	290°
47	2.37	0.0	298°	46	0.19	0.0	327°
49	1.54	0.0	145°	48	0.15	0.0	107°
51	0.85	0.0	1°	50	0.26	0.0	343°



30.2.3 المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" .

تعد الأفران ذات القوس الكهربى من أكبر المصادر المولدة للتوافقيات كما فى مصانع الحديد والصلب ، وتتشابه معها معدات اللحام بالقوس الكهربى. حيث تقوم فكرة عمل هذه الأجهزة على عمل تيار قصر "Short Circuit" قيمته مرتفعة جدا فتسحب تيارا عاليا يصهر المعدن من سخونته ، وعن طريق التشغيل المتقطع لهذه العملية نستطيع الوصول لدرجة حرارة معينة لصهر المعادن ، ولكن هذا التقطيع للتيار للأسف ينتج ما تسمى بالتوافقيات "Harmonics" مما يوثر على جودة القدرة عند المصدر والذى بدوره يؤثر على الأحمال المجاورة لمثل هذه المنشأت الصناعية وداخل المنشات أيضا .

المحولات:

المحولات ومثلها الأجهزة الكهرومغناطيسية لا تولد توافقيات طالما أنها تعمل فى المنطقة الخطية من منحنى مغنطة المواد المغناطيسية (يعرف أيضا بـ B-H curve) كما فى الشكل 30-11 ، ورغم أن شكل الفيض الناشئ يشبه شكل الجهد الذى انشأه إلا أن التيار المسحوب يتأثر بالـ non-linearity c/cالتى تميز علاقة الجهد والفيض فيصبح غير خطى كما فى الشكل وبالتالي يصبح المحول مصدرا للتوافقيات بسبب اختلاف شكل التيار عن شكل الجهد إذا دخل فى منطقة التشبع.

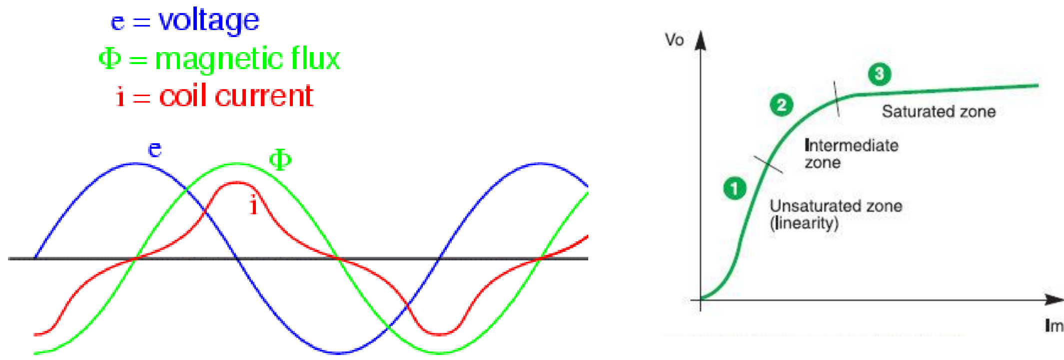


Figure 300-11 التوافقيات فى المحول

وخلال المنطقة الخطية تكون العلاقة بين الجهد والتيار علاقة خطية ، أما إذا تجاوزت هذه المنطقة ودخلت فى منطقة الـ Saturation فعندها تصبح العلاقة بين الجهد والتيار غير خطية وتظهر التوافقيات. ورغم أن كمية التوافقيات عادة لا تكون كبيرة ولكن بسبب كثرة عدد المحولات بالشبكة فإنها تصبح مؤثرة.

ولاعتبارات عملية تكون غالبا نقطة تشغيل المحولات قريبة من نهاية المنطقة الخطية وهذا يعنى أن أى زيادة طفيفة فى جهد الدخول ستسبب دخول المحول فى منطقة التشبع وتوليد توافقيات ، على سبيل المثال فى الصباح الباكر تكون الأحمال فى الشبكة منخفضة والجهد نسبيا مرتفعا وهذا يجعل المحول يدخل فى منطقة التشبع وهذا يفسر تغير مستوى التوافقيات خلال النهار.

والجدول 30-4 يلخص رتب التوافقيات فى بعض من الأجهزة الواسعة الانتشار.

Table 30-4

Device	Predominant Harmonics					
	3rd	5th	7th	9th	11th	13th
1Ph Computer Power Supplies	■	■		■		
3Ph Computer Power Supplies		■	■			
3Ph UPS		■	■			
Electronic Ballasts	■	■		■		
6 Pulse Drive		■	■			
12 Pulse Drive					■	■

30.3 سمات هامة للتوافقيات.

الاختلاف فى التوافقيات ليس فقط ناتج عن الاختلاف فى قيمة التردد ، حيث التوافقية الثالثة مثلا ترددها 150 والخامسة ترددها 250 وهكذا ، فليس هذا هو الاختلاف الوحيد بين التوافقيات وبعضها البعض ، ولكن التوافقيات تختلف أيضا فيما بينها حسب الـ Phase Sequence . على سبيل المثال فالمعادلات الممثلة للتوافقية الثالثة هى

$$i_{a3} = I_{a3} \sin 3\omega t$$

$$i_{b3} = I_{b3} \sin 3(\omega t\text{-}120°) = I_{b3} \sin (3\omega t\text{-}360°) = I_{b3} \sin 3\omega t$$

$$i_{c3} = I_{c3} \sin 3(\omega t\text{-}240°) = I_{c3} \sin (3\omega t\text{-}720°) = I_{c3} \sin 3\omega t$$

وهنا تظهر المفاجأة الغريبة وهى أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الثالثة جميعها فى نفس الاتجاه ولا يوجد بينهم اى Phase Sequence ولذا سميت التيارات التى تحمل هذه التوافقية بالـ Zero Sequence Currents.

أما المفاجأة الثانية فتظهر حين نكتب معادلات التوافقية الخامسة فى الـ three phases على النحو التالي:

$$i_{a5} = I_{a5} \sin 5\omega t$$

$$i_{b5} = I_{b5} \sin 5(\omega t\text{-}120°) = I_{b5} \sin(5\omega t\text{-}600°) = I_{b5} \sin(5\omega t\text{-}240°)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \sin 5(\omega t\text{-}240°) = I_{c5} \sin(5\omega t\text{-}1200°) = I_{c5} \sin(5\omega t\text{-}120°)$$

وهنا تظهر المفاجأة الثانية وهى أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الخامسة جميعها تدور فى نفس الاتجاه عقارب الساعة أى أن التيارات التى تحمل هذه التوافقية تتميز بأنها من النوع المعروف بالـ Negative Sequence Currents.

فإذا نظرنا إلى معادلات التوافقية السابعة ستكتشف أنها من التوع المعروف بالـ Positive Sequence Currents كما هو واضح من المعادلات التالية

$$i_{a7} = I_{a7} \sin 7\omega t$$

$$i_{b7} = I_{b7} \sin 7(\omega t\text{-}120°) = I_{b7} \sin(7\omega t\text{-}840°) = I_{b7} \sin(7\omega t\text{-}120°)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \sin 7(\omega t\text{-}240°) = I_{c7} \sin(7\omega t\text{-}1680°) = I_{c7} \sin(7\omega t\text{-}240°)$$

والشكل 30-12 يلخص ما سبق

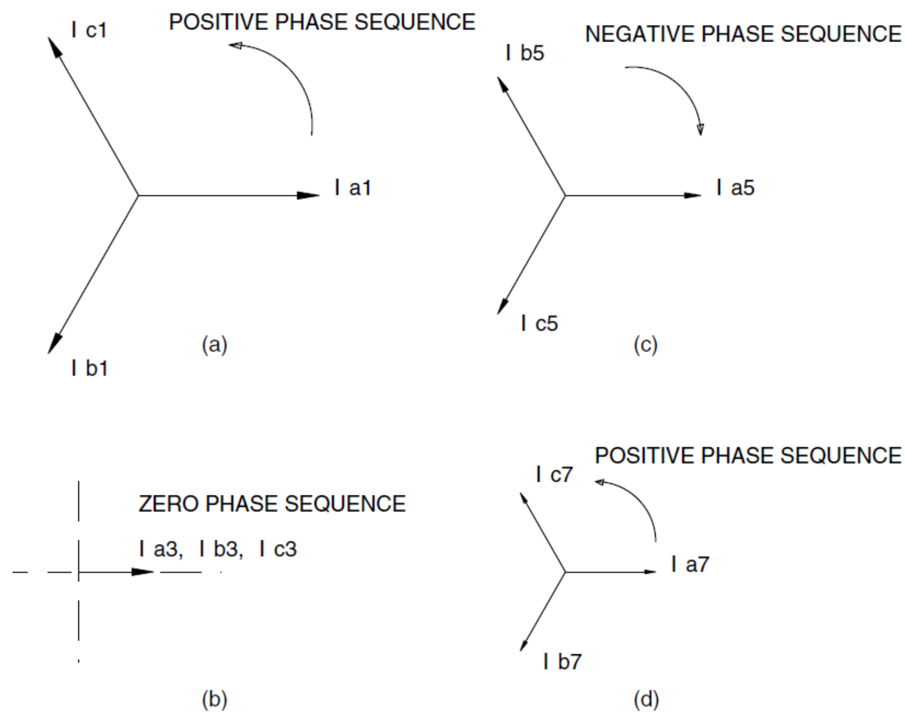


Figure 30-12

كما أن الجدول 30-5 يجمل نتائج بقية التوافقيات المعروفة والـ Phase Sequence الخاص بكل واحدة.

Table 30-5

Harmonic Order vs. Phase Sequence

Harmonic Order	Sequence
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Positive
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negative
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Zero

الخلاصة حتى الآن أن التوافقيات لها ترددات مختلفة ولها أيضا Phase Sequence مختلفة . والنقطة الثانية هامة جدا حين ندرس موضوع الـ Harmonic Cancellation حيث يمكن إجراء بعض التعديلات على قيم الزوايا من أجل أن تلغى مركبة مركبة أخرى كما سنرى.

30.4 كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات؟

يوجد معاملان مستخدمان لهذا الغرض :

1- الأول هو الـ Individual Harmonic Distortion ويقيس نسبة التشوه الناتج من وجود توافقية محددة واحدة مقارنة بالموجة الأصلية (سواء فى الجهد أو التيار)

2- الثانى هو الـ Total Harmonic Distortion ويقيس نسبة التشوه الناتج من وجود كل التوافقيات مقارنة بالموجة الأصلية (سواء فى الجهد أو التيار)

حساب الـ Individual Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما فى المعادلة التالية (للتيار) .

$$IHD_n = I_n/I_1$$

حساب الـ Total Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما فى المعادلة التالية (للتيار) .

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots)}$$

$$THD = (I_H/I_1) \times 100\%$$

مثال:

احسب الـ THD فى إشارة الجهد علما بأن القياسات أظهرت وجود توافقيات بالقيم التالية.

احسب أيضا الـ IHD .

Fundamental = V1 = 114 V

3rd harmonic = V3 = 4 V

5th harmonic = V5 = 2 V

7th harmonic = V7 = 1.5 V

9th harmonic = V9 = 1 V

الحل:

$$\text{RMS value of the harmonics} = V_H = \sqrt{(4^2 + 2^2 + 1.5^2 + 1^2)} = 4.82 \text{ V}$$

$$THD = (4.82/114) \times 100 \cong 4.23\%$$

ولحساب الـ Individual Harmonic Distortion

$$IHD_3 = 4/114 = 3.51\%$$

$$IHD_5 = 2/114 = 1.75\%$$

$$IHD_7 = 1.5/114 = 1.32\%$$

$$IHD_9 = 1/114 = 0.88\%$$

30.5 المشاكل الناتجة عن التوافقيات.

تسبب التوافقيات مشكلات عديدة للمعدات الكهربية المختلفة وأجهزة التحكم مما يؤدى إلى انخفاض كفاءة تشغيلها أو تعطيل عملها. وفيما يلي أهم المشكلات الناتجة عن التوافقيات فى أجهزة ومعدات الشبكة الكهربية.

30.5.1 تأثير التوافقيات على المحولات:

تؤثر التوافقيات على المحولات تأثير مزدوجا حيث تسبب زيادة فى المفاقيد النحاسية والمفاقيد الحديدية ويكون التأثير الإجمالى هو زيادة سخونة المحول.

يعتمد الفقد فى المحول الناتج عن التوافقيات على التردد وتكون التوافقيات ذات القيمة العالية فى التردد لها تأثير ملحوظ على الفقد Losses وتؤدى زيادة درجة الحرارة إلى تدهور العزل مما يؤدى إلى تعطل المحول بالكامل.

تأثيرها على الـ Eddy current Losses

$$W_e = k_e B_{max}^2 f^2$$

تأثيرها على الـ Hysteresis loss

$$W_h = k_h B_{max}^{1.6} fV$$

وينبغي – إذا كان من المتوقع وجود توافقيات بنسب عالية – استعمال محولات خاصة يتم تصميمها على أساس هامش أمان أكبر يعرف بالـ K-Factor ، وبالطبع هذا يؤدى إلى زيادة تكلفة المحول ويكون البديل لذلك هو خفض قدرة تحميل المحول فى وجود التوافقيات.

30.5.2 ما هو الــ K-Factor

ظهرت أهمية هذا المعامل مع تزايد نوعية الأحمال التى بها أجهزة إلكترونية والتى تستخدم Hi Speed-Electronic Switches، وكذلك مع تزايد استخدام لمبات التفريغ الكهربى Discharge Lamp ، فكل هذه الأحمال تصنف على أنها أحمال غير خطية Non-Linear loads بمعنى آخر أن إحتمال وجود الـ Harmonics المسببة لارتفاع درجة حرارة المحول يكون كبيرا.

ومن هنا ظهرت الحاجة لوجود نوعية من المحولات لها تصميم خاص للتعامل مع النسبة العالية لوجود الأحمال الغير خطية. على سبيل المثال فالـ K-4 Transformers تستخدم إذا كانت نسبة الأحمال الغير خطية تصل نسبتها إلى 50% ، وعادة تستخدم هذه النوعية من المحولات فى تغذية المبانى الإدارية التى تكثر بها هذه النوعية من الأحمال . ويمكن الرجوع للجدول 30-6 لمعرفة الـ K-Factor المناسب للمحول حسب نوعية الأحمال الموصلة عليه.

Table 30-6

Load	K-Factor
Electric discharge lighting	K-4
UPS with optional input filtering	K-4
Welders	K-4
Induction heating equipment	K-4
PLCs and solid state controls (other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment (e.g. PBX)	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multiwire receptacle circuits in general care areas of health care facilities and classrooms of schools, etc.	K-13
Multiwire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Mainframe computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drives)	K-20
Multiwire receptacle circuits in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20

30.5.3 كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟

تتوقف قيمة هذا المعامل كما ذكرنا على حسب كمية التوافقيات الموجودة بالتيارات المارة بالأحمال المتصلة بهذا المحول. ولذا فالخطوة الأولى لحساب هذا المعامل هو تحديد قيمة كل توافقية بالتيار بما فيها الـ Fundamental ثم من هذه القيم نحسب قيمة التيار الكلى

$$I_T = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + ..}$$

ثم نحسب نسبة كل توافقية بالنسبة للتيار الكلى

$$I_1^{'} = \frac{I_1}{I_T} \; and \; I_3^{'} = \frac{I_3}{I_T} \; etc$$

وأخيرا نطبق فى المعادلة التالية لحساب قيمة الـ k-Factor

$$K = I_1^{'2} * f_1^2 + I_3^{'2} * f_3^2 + I_5^{'2} * f_5^2 + \cdots .$$

مثال

احسب قيمة الـ K–Factor المناسبة لمحول يغذى أحمالا غير خطية علما بأن قيم التيار كالتالي:

200A	of fundamental (60 Hz),
30A	of 3rd harmonic,
48A	of 5th harmonic
79A	of 7th harmonic.

الحل:

$$I_T = \sqrt{200^2 + 30^2 + 48^2 + 79^2} = 222.4A$$

$$I_1' = \frac{200}{222.4} = 0.899 \; and \; I_3' = \frac{30}{222.4} = 0.135 \;\; and \; I_5' = \frac{48}{222.4} = 0.216 \; and \; I_7' = \frac{79}{222.4} = 0.355$$

$$K = 0.899^2 * 1^2 + 0.135^2 * 3^2 + 0.216^2 * 5^2 + 0.355^2 * 7^2 = 8.31$$

وهذا يعنى أننا نحتاج لمحول له تيار مقنن لا يقل عن 222 أمبير وله K–Factor يساوى 9.

30.5.4 تأثيرات متنوعة للتوافقيات

تأثير التوافقيات على الآلات والمحركات الدوارة:

تتأثر الآلات والمحركات الدوارة بالتوافقيات وتزداد سخونتها الناتجة من الفقد فى الحديد والنحاس عند التوافقيات وقد تؤثر التوافقيات على العزل وتؤدى أيضا إلى زيادة الضوضاء.

ويمكن تفسير ذلك بسهولة من تذكر أن التيار المتردد يميل للمرور على السطح الخارجى للموصل Skin effect ، لاسيما مع زيادة التردد ، فلو علمنا أن لدينا ترددات تصل للرتبة الأربعين فى تيار المحركات بسبب أجهزة التحكم فى البدء لهذه المحركات وغيرها من أجهزة الـ variable frequency drives (VFDs) فإن هذه التوافقيات العالية ستجعل التيار فى بارات الـ Rotor يسير فى طبقة ضئيلة جدا ومن ثم ترتفع قيمة المقاومة وبالتالى يسخن المحرك بشدة.

ظاهرة الزحف فى المحركات

Crawling and cogging are related to space harmonics. The above question is about time harmonics.The speed of an IM with respect to nth harmonic is nNs where Ns is the synchronous speed of the motor with respect to fundamental voltage harmonic. Morover 3rd harmonic is destroyed in 3 phase windings of IM.5th harmonic is negative sequence harmonic .hence it rotates at -5Ns with respect to the rotor speed.7th is a positive sequence harmonic and rotates at 7Ns ,11th negative and so on... For negative sequence harmonics ,slip is >1 where as for positive sequence harmonics s<1
In this way the rotor gets the tendency to reverse its direction of rotation back and forth .Also additional losses are attatched with these harmonics which all together result in a pulsating nature of torque under non sinusoidal voltage supply(combination of harmonics)

يمكن أن تؤدى التوافقيات فى المحرك الحثى إلى ظاهرة الامتناع عن الحركة. وتفسير ذلك أن بعض الترددات الناشئة فى التيار تكون من النوع الـ negative sequnce ستنتج Reverse Torque أو ما يسمى بالـ Breaking Torque ، وقد تؤدى التوافقيات عالية الدرجة إلى تدهور أداء أجهزة التحكم فى السرعة وأجهزة بدء الحركة الالكترونية الخاصة بالمحركات والسبب فى ذلك أن التوافقيات تؤدى إلى تشوه شكل إشارة الجهد ، ومعلوم أن أساس عمل هذه المحركات مبنى على قاعدة أن مرور 3-phase currents سينتج Rotating Field فى منطقة الـ Air gap ، ومن ثم فالتشوه بسبب التوافقيات سيجعل القاعدة السابقة مضطربة خلال البدء على الأقل لاسيما بسبب neqative sequence torgues.

تأثير التوافقيات على الكابلات:

يظهر تأثير التوافقيات على الكابلات فى عدة مظاهر منها زيادة مقاومة الموصل لارتفاع درجة حرارته كما تزداد مقاومة الموصل نتيجة لميل التيار ذات التردد العالي للتواجد بالقرب من السطح الخارجي للموصل و هو ما يعرف باسم *Skin Effect* ، كما تتسبب التوافقيات فى زيادة الهبوط فى الجهد نتيجة ارتفاع المقاومة ، و ينتج عن هذا عدم وصول الجهد إلى المستهلك بالقيمة المطلوبة ، و كذلك تتسبب فى ارتفاع الجهد عند نقطة التعادل.

نذكر أيضا بأن ارتفاع حرارة الكابل بسبب التوافقيات ليس فقط بسبب *Skin Effect* كما سبق وإنما هناك مصدر آخر للحرارة وهو ارتفاع قيمة الـ Dielectric losses طبقا للمعادلة:

$$P_d = 2\pi f C V^2 \tan\delta$$

وهذا يعنى سخونة إضافية للكابل .

التأثير على موصل التعادل "Neutral Cables".

ففى الحالة الطبيعية يكون مجموع التيارات المارة بموصل الـ Neutral يساوى صفر (جمع اتجاهي وليس جبري)، وذلك فى الحالة المتزنة "Balanced" ، أما فى حالة عدم الاتزان "Unbalanced" فيكون تيار خط التعادل لا يساوى صفرا.

ولكن نظرا لوجود التوافقيات "Harmonics" من الرتبة الثالثة ومضاعفاتها والتى تتميز بعدم وجود Phase Angle بين فازاتها الثلاثة فإنه بالتأكيد سيكون مجموع التيارات جبريا ولن يساوى صفر ، مما سيؤدى إلى رفع درجة حرارة الكبل ويحدث له "Over heating" ، وبالتالي سنحتاج إلى معالجه هذه المشكلة عن طريق زيادة معدلات تحمل كبل التعادل لتفادى هذه التأثيرات وأيضا بعض الحلول الأخرى مثل زيادة مقطع موصل التعادل ، وهذا هو السبب فى ظهور ما يسمى Full size neutral conductor ، حيث كان قديما مع الأحمال الخطية كنا نستخدم ما يسمى Reduced neutral size . بمعني أنه سابقا مثلا كان يتم استخدام كابلات مساحة مقطعها 120+240*3مم^2 ، وكان مساحة مقطع كابل التعادل 120 مم^2 ، أما الآن فيستخدم 4*240 مم^2 ، وهذا في المباني الإدارية التي تنتشر بها أجهزة الحاسب الآلي واللمبات الموفرة ولمبات اللد .

مع ملاحظة أن ارتفاع تيار خط التعادل يؤدى بالضرورة إلى ارتفاع الجهد بين الـ Neutral والـ Earth عن القيمة الأساسية (طبقا للمواصفات القياسية العالمية IEEE1100-92) .

تأثير التوافقيات على مصابيح التفريغ الغازية:

من الممكن أن يحدث أعطال فى choke coils بسبب السخونة الزائدة التي تسببها التوافقيات.

تأثير التوافقيات على معامل القدرة

معامل القدرة الذى نحسبه بالمعادلات التقليدية (P.F = P/(V.I)) يعتبر صحيح فقط طالما أن تردد إشارتى الجهد والتيار هو 50Hz ، أما مع تواجد التوافقيات فى الدائرة فإن معامل القدرة الحقيقى True PF يحسب من المعادلة التالية:

$$pf_{true} = \frac{P_{avg}}{V_{1rms} I_{1rms}} \bullet \frac{1}{\sqrt{1+(THD_V/100)^2}\ \sqrt{1+(THD_I/100)^2}},$$

ويمكن إهمال تأثير التشوه في إشارة الجهد لأنه دائما صغير القيمة كما ذكرنا سابقا ومن ثم تصبح المعادلة السابقة بعد التبسيط كما يلى :

$$pf_{true} \approx \frac{P_{avg1}}{V_{1rms} I_{1rms}} \bullet \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I/100)^2}}$$

والشكل 30-13 يظهر كيفية تأثر قيمة معامل القدرة مع زيادة التشوه فى التيار والذى نعبر عن هذا التشوه بقيمة الـ THD-i

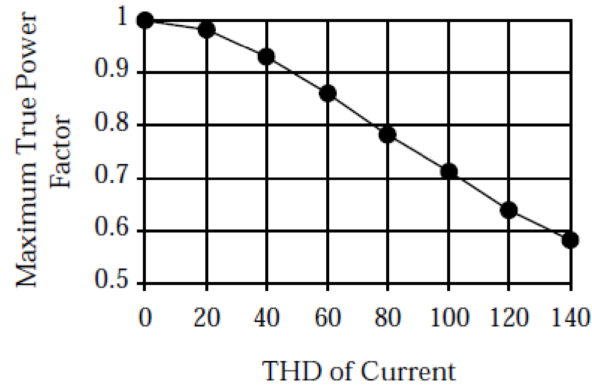


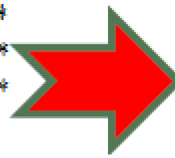
Figure 300-30-13

والجدول 30-7 يعطى قيم معامل القدرة لبعض الأجهزة المشهورة ونسبة التشوه فى إشارة التيار بهذه الأجهزة.

Table 30-7

Table 1: Power Factor and Current Distortion Measurements for Common Single-Phase Residential Loads

Load Type	***pf disp***	***THDI***	***pf dist***	***pf true***
Ceiling Fan	0.999	1.8	1.000	0.999
Refrigerator	0.875	13.4	0.991	0.867
Microwave Oven	0.998	18.2	0.984	0.982
Vacuum Cleaner	0.951	26.0	0.968	0.921
Fluorescent Ceiling Lamp	0.956 *	39.5	0.930	0.889
Television	0.988 *	121.0	0.637	0.629
Desktop Computer and Printer	0.999 *	140.0	0.581	0.580



والملاحظ هنا انخفاض المعامل الحقيقي بسبب التوافقيات ، ومعلوم أن أي انخفاض فى معامل القدرة يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع التيار فى الشبكة مما يتسبب عنه فقد فى القدرة فى الكابلات الأرضية و خطوط النقل و كذلك فى المحولات الكهربية ، وينتج عن ذلك ارتفاع فى درجة الحرارة ، مما قد يتسبب فى انهيار بعض مكونات الشبكة و كذلك يتسبب انخفاض معامل القدرة في زيادة الهبوط فى الجهود .

تأثير التوافقيات على أجهزة القياس:

تتم معايرة عدادات استهلاك الطاقة على أساس أن التغذية الكهربية تتم من موجة ذات شكل جيبي خالص وقد تعطى هذه العدادات قراءات خاطئة عند وجود التوافقيات لاسيما الأجهزة التى تعتمد على قياس Aveage.

والسبب فى ذلك يمكن فهمه بالرجوع لحسابات THD سواء فى إشارة الجهد او التيار ، حيث تلاحظ ارتفاع قيمة التيار بالذات بسبب وجود التوافقيات وقد تصل الزيادة إلى 100% من قيمة التيار الأساسي (المحسوب على 50Hz).

ومن الجزء السابق تجد أن التوافقيات قد أثرت بشدة على قيمة معامل القدرة Power factor وهذا سبب آخر لظهور الأخطاء فى أجهزة القياس. فمعامل القدرة الحقيقى True PF هو محصلة جزئين :

- الأول هو displacement power factor الناتج عن الفرق الطبيعى بين الجهد والتيار بسبب طبيعة الحمل
- الثانى هو distortion power factor الناشئ بسبب التوافقيات.

وغالبا ما يكون المعامل الناتج عن جمعهما true PF أقل من المعامل الأصلى بسبب التشوه كما فى الجدول 30−7 السابق.

تأثير التوافقيات على المكثفات

تأثير التوافقيات على المكثفات غالبا ما يكون مدمرا ، فمعلوم أن معاوقة المكثف $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ وهذا يعنى أن ارتفاع رتبة التوافقيات سيؤدى إلى انخفاض معاوقة المكثف ومن ثم يسحب تيار عاليا ويحترق.

والمكثفات تعانى من ظاهرة كارثية أخرى مرتبطة بالتوافقيات وهى ظاهرة الرنين والتى سندرسها تفصيلا فى الجزء التالى.

30.6 ظاهرة الرنين

من أخطر الظواهر المصاحبة لوجود التوافقيات ظهور ما يعرف بظاهرة الرنين Resonance .

فوجود المكثفات فى الشبكة أصبح شيئا معتادا سواء فى طبيعة المعدات مثل الكابلات ، أو فى كثير من الأجهزة التى شاع استخدامها فى الشبكات مثل معوضات القدرة غير الفعالة SVC ، وقد يحدث انهيار لبعض مكونات الشبكة إذا تساوت المقاومة الحثية (Inductive reactance) الناتجة عن دوائر الحث فى الشبكة مع المقاومة السعوية (Capacitive reactance) عند توافقيات معينة ، وبأسلوب آخر قد تحدث ظاهرة الرنين عند بعض الترددات تؤدي إلى زيادة الجهود في الشبكة.

ويمكن أن تنشأ دائرة رنين بين مكثفات الخطوط والكابلات أو مكثفات تحسين معامل القدرة ، وبين ملفات الأحمال ، سواء كان ذلك ناتجا عن وجود هذه المكثفات والملفات فى وضع توازى أو توالى معا.

30.6.1 خطورة ظاهرة الرنين

إذا تواجد فى الشبكة تردد معين f_n يجعل $\omega L = 1/\omega c$ اى أن معاوقة الملف تساوى معاوقة المكثف كما فى المعادلة ، فعندئذ يحدث الرنين وعنده يكون مجموع المعاوقتين يساوى صفر لأن إشارة معاوقة المكثف عكس إشارة معاوقة الملف ، وهذا يعنى أنه – فى عدم وجود مقاومة أومية – تكون معاوقة الدائرة الكلية = صفر ، وكأنه قد حدث لدينا Short circuit (Z= 0) بدون وجود Short مادى فى الدائرة.

وتتراوح قيم F_n فى الشبكات بين 800 إلى 1000 هرتز حسب القيم النمطية لـ L_S and C_S (Indactance and capacitance of the source) ، وهذا يفسر عدم حدوث رنين فى الظروف العادية حيث التردد هو 50 هرتز وهو بالطبع بعيد عن التردد الرنينى.

ملحوظة:عند حدوث رنين يكون وجود أحمال عبارة عن مقاومات أومية شيئا مرغوبا جدا لأنها الوحيدة التى لا تتأثر بالتردد ومن ثم تبقى مقاومتها هى المقاومة الوحيدة الباقية فى الدائرة وتقوم بعمل تحجيم limitation لقيم التيار المار أثناء حدوث الرنين.

ودوائر الرنين هذه نوعان : رنين توازى ورنين توالى .

30.6.2 رنين التوازى

يحدث عندما تكون المكثفات والملفات فى الدائرة موصلين على التوازى ، وقد يحدث هذا الرنين بين Self capacitance للخط X_{CS} وبين ملفات المعدات X_L ، أو يحدث بين الـ Self capacitance وبين الـ Equivalent reactance, X_{LS} للشبكة والتى تتوقف قيمتها على قيمة الـ Short Circuit capacity, SCC للخط كما فى الشكل 30-14.

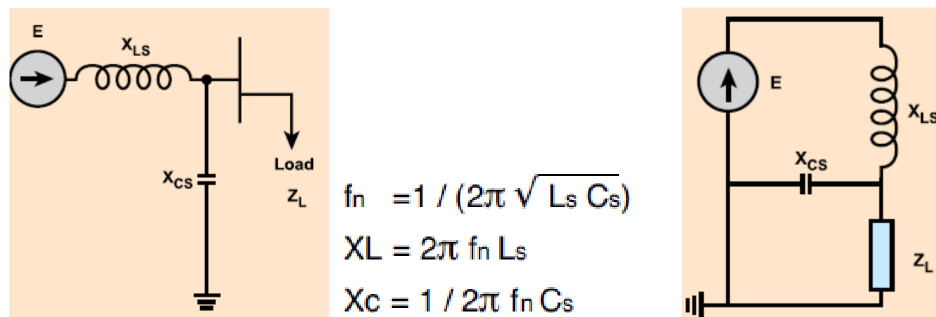


Figure 300-14

وهو النوع الأول ، ويحدث هذا الرنين أيضا عند بين مكثفات تحسين معامل القدرة وبين الـ Network inductance في وجود أحمال غير خطية منتجة للتوافقيات كما فى الشكل 30-15 .

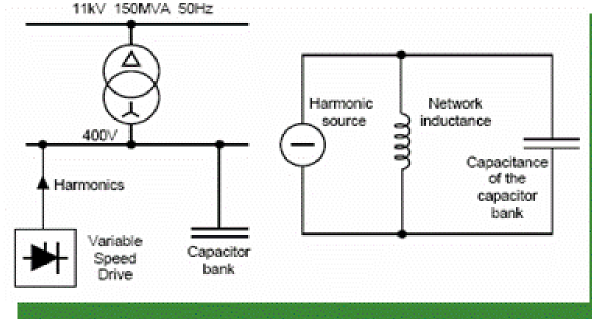


Figure 300-15

30.6.3 رنين التوالى

أما النوع الثانى من هذه الظاهرة فهو رنين التوالي ويحدث حين يكون لدينا مكثفات وملفات موصلة على التوالى كما فى الشكل 30-16 ، وعلى سبيل المثال عند توالى محول التوزيع مع مكثف تحسين معامل القدرة المركب على نفس الـ BB . والمشكلة تشبه تماما ما شرحناه فى النوع الأول.

ملحوظة هامة:

رنين التوالي يظهر على شكل زيادة كبيرة فى التيار بدون وجود أى Short مادى بالدائرة ، بينما رنين التوازى يظهر على شكل زيادة كبيرة فى الجهد . وهذا هو خطورة ظاهرة الرنين.

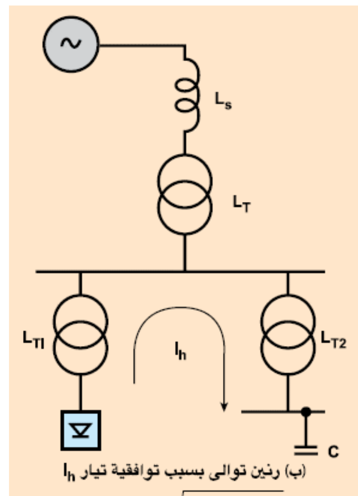


Figure 300-3016

30.7 الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربية:

تنص معظم المواصفات القياسية العالمية على الحدود المسموح بها للتوافقيات وذلك لحماية معدات ومكونات الشبكة الكهربية من الآثار الناتجة عن وجود توافقيات التيار والجهد وتحدد هذه المعاملات كما فى الجزء التالى.

30.7.1 المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992

تعتبر هذه المواصفة أشهر المواصفات الخاصة بالتوافقيات

وهذه المواصفة تضع حدودا قصوى للتوافقيات المسموح بظهورها فى إشارات الجهد والتيار عند نقطة اتصال الجهاز بالشبكة Point of Common Coupling PCC.

فالجداول رقم −1 و 2 و 3 فى الشكل التالى تعطى مستوى تشويه التوافقيات المنفردة كنسبة مئوية من أقصى تيار يسحبه الحمل وذلك فى خمس حالات مختلفة حسب نسبة الـ SCC/I_{Load} .

مرتفعة) كلما كانت النسب المسموح بتجاوزها أكبر وذلك كما قلنا SCC ونلاحظ أنه كلما كانت الشبكة قوية (BBسابقا أن ارتفاع قيمة القصر تعنى انخفاض قيمة المعاوقة وهذا يعنى انخفاض تأثر الجهود عند الـ المختلفة بمرور تيارات التوافقيات ومن ثم يمكن السماح بقيم أعلى نسبيا.

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)

جدول رقم (١) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (١٢٠ ف ـ ٦٩ ك ف)

Maximum Harmonic Current Distortion (in Percent of I_L)

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.

* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

where

I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

جدول رقم (٢) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (٦٩ ـ ١٦١ ك ف)

Maximum Harmonic Current Distortion(in Percent of I_L)

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.

* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

where

I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

جدول رقم (٣) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (>١٦١ ك ف)

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.

* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

where

I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

أما الجدول 4 فيعطى النسب المسموح بها فى إشارة الجهد وذلك :

للتوافقية الواحدة Individual Voltage Distortion أو لمجموع التوافقيات كلها Total Harmonic Distortion . مع العلم بأنه يسمح بتجاوز هذه القيم بنسبة 50% زيادة عند الفترات العابرة مثل بدء المحركات وبدء تشغيل المحولات.

جدول رقم (٤) : حدود تشوهات الجهد

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 KV and below	3.0	5.0
69.001 KV through 161 KV	1.5	2.5
161.001 KV and above	1.0	1.5

NOTE : High voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user

ملحوظة:

المواصفة السابقة تهتم بالشبكة ككل ونقطة الربط مع المشتركين ، ولكن توجد مواصفات أخرى تهتم بالمكون نفسه ، بمعني هل التوافقيات التي يصدرها هذا الحاسب الآلي مثلا مسموح بها أم لا؟ دون النظر للشبكة ، مثل المواصفة IEC 61000-3-2 التي تهتم بمعظم الأجهزة المنزلية والتجارية التي يقل تيارها عن 16 أمبير . ولكن هذه المواصفة لا تنظر إلى THD ولكن تنظر إلى individual harmonic distortion. وقد سبق شرح الفرق بينهما.

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current A
Odd harmonics	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \le n \le 39$	$0{,}15 \ \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \le n \le 40$	$0{,}23 \ \frac{8}{n}$

فمثلا التوافقيه الثالثة لا تتعدى 2.3 امبير وهكذا ينظر إلى كل order وليس THD.

30.8 الحلول المستخدمة لمنع ظهور التوافقيات

هناك طرق للتخلص من مصادر توليد التوافقيات الشديدة فى الشبكة المغذية للمستهلك ، من أهمها :

1- تقوية الشبكة بزيادة مقطع الكابلات أو إضافة كابلات ، وهذا سيؤدى إلى عدم تغير قيمة إشارة الجهد فى الـ BBs التى ستمر خلالها تيارات التوافقيات كما سبق شرحه.

2- خفض نسبة تحميل المحولات حتى لا تدخل فى منطقة الـ non linearity فى منحنى الـ magnitaization .

3- إعادة توزيع الأحمال لتقليل نسب عدم الاتزان بشبكات التوزيع.

4- تقليل نسبة الأحمال غير الخطية بحيث لا تتجاوز 30% من قدرة كل محول ، مع تخفيض النسبة إلى 15% إذا كان هناك مكثفات مركبة لتحسين معامل القدرة.

5- تجنب حدوث الرنين ، ويمكن معرفة التردد الذى يحدث عنده رنين بين المكثفات المركبة وبين ملفات الشبكة من المعادلة التالية:

$$hr = \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{kVAR_C}}$$

حيث

hr = resonant frequency as a multiple of the fundamental frequency

$kVAsc$ = short circuit current as the point of study

$kVARc$ = capacitor rating at the system voltage

غير أن الأسلوب الأشهر هو وضع Filters بالقرب من الأحمال لمنع انتشار تأثيرها فى الشبكة . وهناك أنواع عديدة لهذه الـ Filters منها :

- "Passive Harmonic Filters ".
- "Active Harmonic Filters " .
- "Compound Harmonic Filters".

30.8.1 أولا :- الـ "Passive Harmonic Filters" .

يوجد طريقتان لاستخدام هذا الـ " filters" وهما : التوصيل على التوالى والتوصيل على التوازى .

فى حالة التوصيل هذا الفلتر على التوازى مع الحمل كما فى الشكل 30-17 تكون فكرة تصميم الفلتر هى ضبط قيم الـ L وقيم الـ C الخاصة بالفلتر لتصبح معاوقتها صغيرة جدا بالنسبة لتردد توافقية معينة ومن ثم فعند مرور تيار هذه التوافقية فإن ها ستفضل المرور بدائرة الفلتر عن المرور بالحمل ومن ثم تكون قد نجحنا فى اصطياد هذه الـ "Harmonics" . وغالبا يصمم هذا الفلتر لاصطياد الرتب الـ " 5th , 7th " .

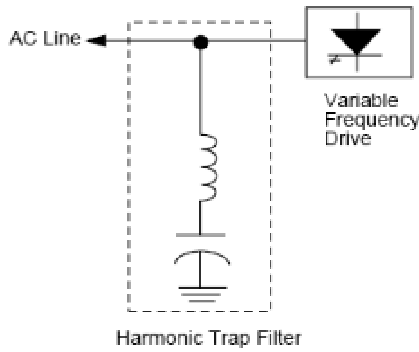


Figure 300-17

وهذا النوع أثبتت النتائج قدرته على التخلص من التوافقيات الفردية خاصة الـ 3rd ، 5th و 7th و كلما زاد الـ order كلما عملت بكفاءة أعلى .

وهذه الفلتر مصممة لتحمل تيار التوافقية harmonic current فقط و أيضا تكون قادرة على نسبة من تيار الحمل تصل إلى 30% من قيمة تيار الأحمال إذا كانت تغذى مجموعة من الelectric drives وهذا ما يميز هذا النوع عن الفلتر عن النوع الـ series ، مما يجعل حجمه صغيرا و غير مكلف .

أما إذا تم تركيب الفلتر على التوالى مع الحمل ، فيكون الفلتر عبارة عن مكثفات و ملفات متصلين على التوازى و يكونوا على التوالى مع الأحمال كما فى الشكل 30-18 ، وتكون فكرته هى اختيار قيم الـ L وقيم الـ C لتعطى معاوقة كبيرة لمرور تيار توافقية معينة بينما تكون قيمة هذه المعاوقة عادية أمام التيار الأصلى.

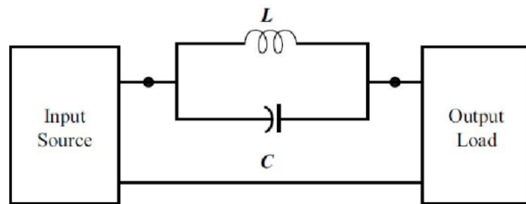


Figure 300-3018

وغالبا يكون الاستخدام الأساسى لهذا النوع من الـ Filters ليس على التوالى مع الأحمال لأن ذلك سيؤثر على قيمة الجهد ، وإنما يكون استخدامها الأساسى فى دوائر الـ Neutral لمنع مرور التوافقية الثالثة مثلا.

ويعيب هذا النوع من الـ Filters أنه يحتاج لمكثفات و ملفات ثقيلة فى الحجم و مكلفة و تلك الـ Filters عند استخدامها تصبح جزء من الشبكة و من ثم فربما تؤثر على ظهور مشكلة الرنين.

30.8.2 ثانيا: - الـــ " Active Harmonic Filters" .

فكرة عمل هذا النوع (شكل 30-19) من الـ Filters أنه يقوم بتوليد توافقيات مساوية للتوافقيات التي يصدرها الحمل ولكن مضادة له في الاتجاه فتكون المحصلة النهائية في الحالة المثالية (صفر توافقيات) ، أو صغيرة جدا في الحدود المسموح بها.

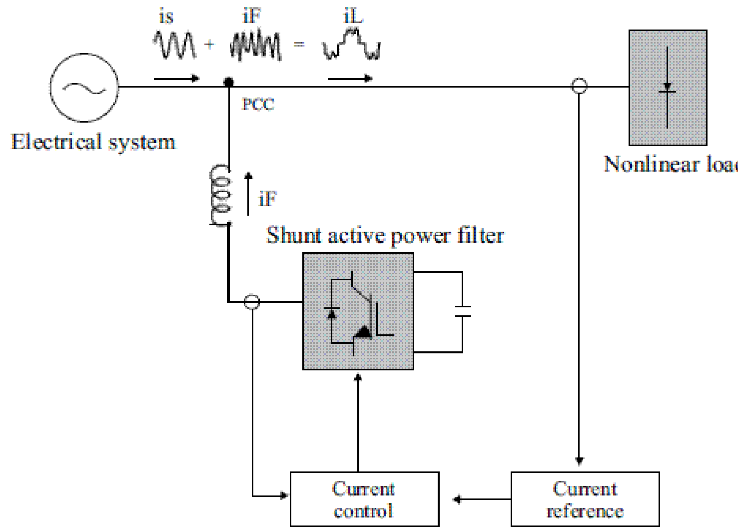


Figure 300-19

بمعنى آخر أنه يولد التوافقيات التي يحتاجها الحمل ويمده بها ، ومن ثم يخفف عبء مرورها فى الشبكة العامة ، ويقوم بهذا الدور بدقة وعند الأحمال المختلفة ، ومن ثم يكون مجموع الـ "Harmonic Wave" المولدة بالفلتر + والـ Pure "" sinusoidal wave القادمة من مصدر التغذية = الـ "distorted current wave" التي تظهر داخل الحمل فقط (ولا يظهر أثرها على الشبكة الخارجية) . ومن ثم يصبح الميزة الأساسية له هو توفير الأحجام الكبيرة التي كانت تستخدم للملفات والمكثفات فى النوع الأول.

30.8.3 ثالثا : الـــ "Compound Harmonic Filters" .

نظرا لارتفاع سعر الـ "active harmonic filter" وأيضا المشكلات التي توجد فى الــ "passive filter" وأهمها ارتفاع احتمالية حدوث ما يسمى بالــ "Resonance" بسبب وجود المكثفات والملفات داخل الدوائر بكثرة فقد تم اللجوء إلى نوع جديد من الـ Filters وهو الذى يحتوى على كل من الـ "passive & Active filter" ويعرف بالـ Compound أو الـ Hybrid .

ففى حالة الـ " harmonic order 5^{th} ,7^{th}" يتعامل معها الــ" passive filter" أما فى حالة الــ harmonic " orders " الأخرى فيستخدم الـــ" Active filter" ، وذلك بتنسيق معين "coordination" بين النوعين من الـ Filters من أجل الحصول على أفضل أداء ينعكس على الـ"power Quality performance" .

30.8.4 فكرة الـــ Harmonic Cancellation

أحد الطرق المميزة والجديدة لتقليل تأثير التوافقيات فى الشبكة هو جعل التوافقيات تلغى بعضها بعضا Harmonic Cancellation . وقد بنيت فكرة هذه الطريقة على أساس أن كل توافقية لها قيمة وزاوية Magnitude and Angle فإذا استطعنا أن نجمع التوافقيات بحيث يكون المجموع الاتجاهى يساوى صفر (كما

فى حالة جمع الـ Balanced Three Phases) فإننا نكون بذلك قد منعنا ظهورها بدون استخدام الـ Filters وبدون القلق من ظاهرة الـ Resonance .

ويمكن تحقيق هذه الفكرة بثلاث طرق:

1- الأولى باستخدام محولات لها توصليلة مختلفة (مثلا D/Y + Y.Y) كما فى المثال العملى التالي.
2- الثانية تكون باستخدام الـ Phase Shifting Transformer ، ففى المحولات العادية يكون دورها هو تغيير قيمة الـ Magnitude وذلك بتغيير قيمة الـ Turns Ratio ، أما هذا النوع من المحولات فإنه لا يغير الـ Magnitude بل يقتصر دوره على تغيير الـ Angle ، ومن ثم يمكن إلغاء (أو على الأقل تقليل قيمة) بعض التوافقيات بجمعها إتجاهيا معا .
3- الثالثة بمحاولة جمع الأجهزة المختلفة وذلك بعد دراسة التوافقيات الصادرة لكل جهاز مع بعض ، بحيث أنه حين تعمل هذه الأجهزة معا فإنها تلاشي التوافقيات (cancellation) أو تقللها (mitigation) كما هو ملاحظ في المثال العملي التالى.

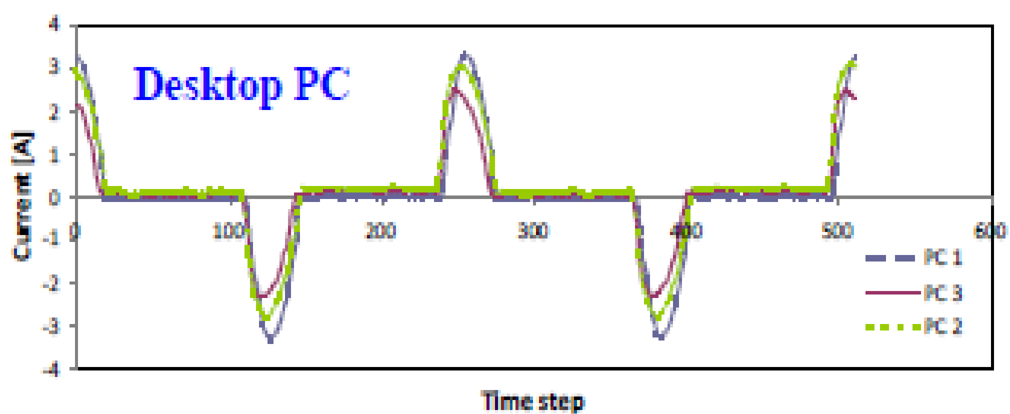
30.8.5 مثال عملى للـ Harmonic Cancellation

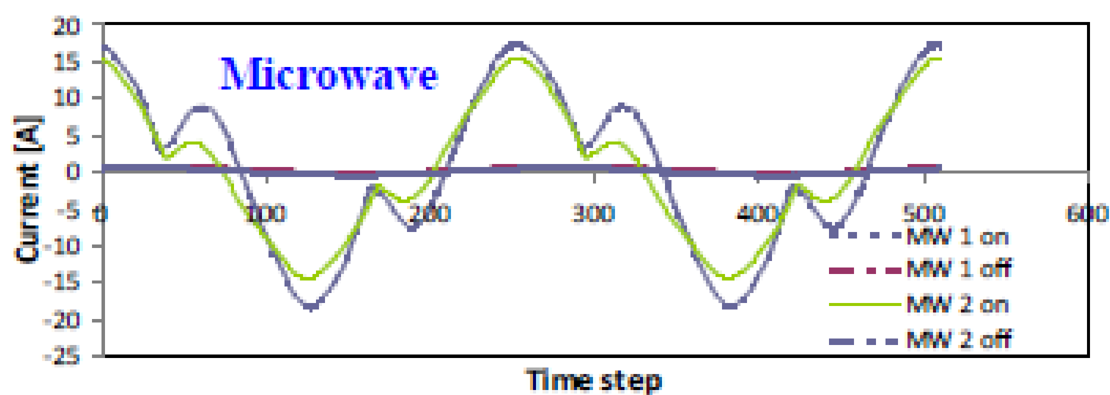
هذه الفكرة هى خلاصة رسالة ماجستير أشرفت عليها ، ويمكن تنفيذها في الأحمال الصغيرة كالأحمال المكتبية والمنزلية حيث يمكن التحكم في الأحمال بسهولة . والفكرة هي دراسة كل حمل على حدة وعمل مخطط للتوافقيات الخاصة به قيمة واتجاه ، ومحاولة جمع الأجهزة التي تختلف فيها التوافقيات اتجاهيا.

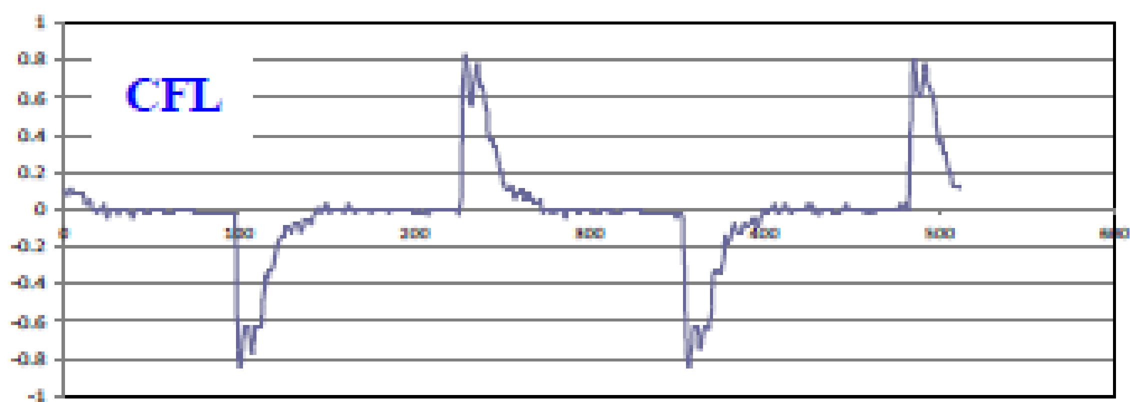
ففي هذا المثال تم عمل دراسة على مجموعة من الأجهزة وهي :

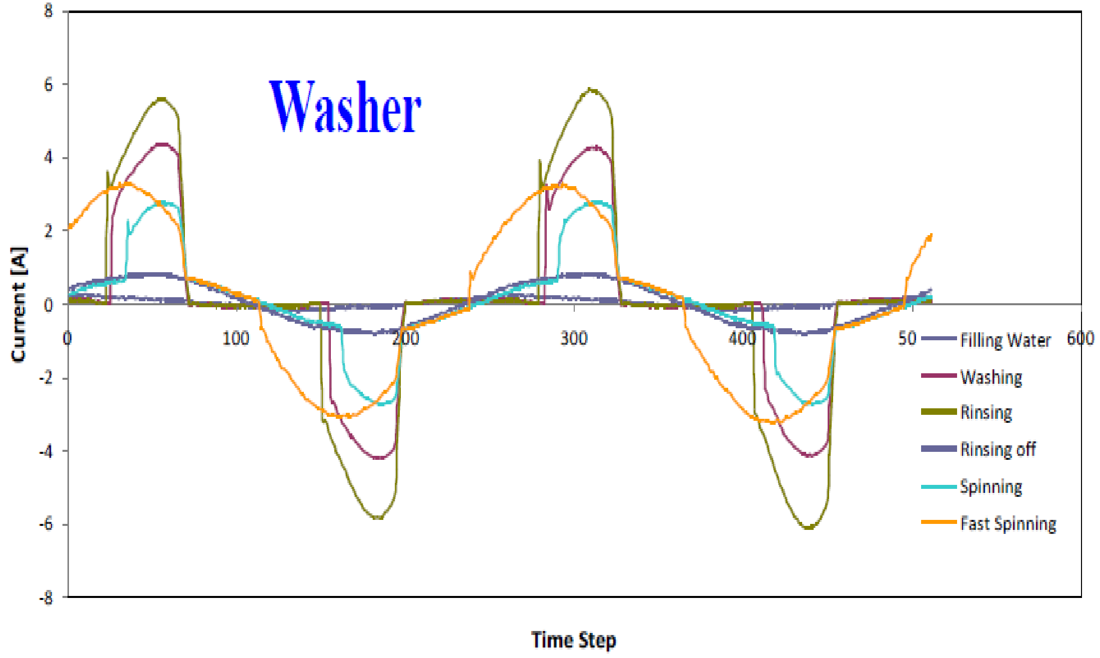
1. حاسب إلى
2. لمبة من نوع CFL
3. ميكروويف
4. غسالة ملابس

ووجد اختلاف في موجه التيار المشوهة كما هو ملاحظ في الشكل التالي :

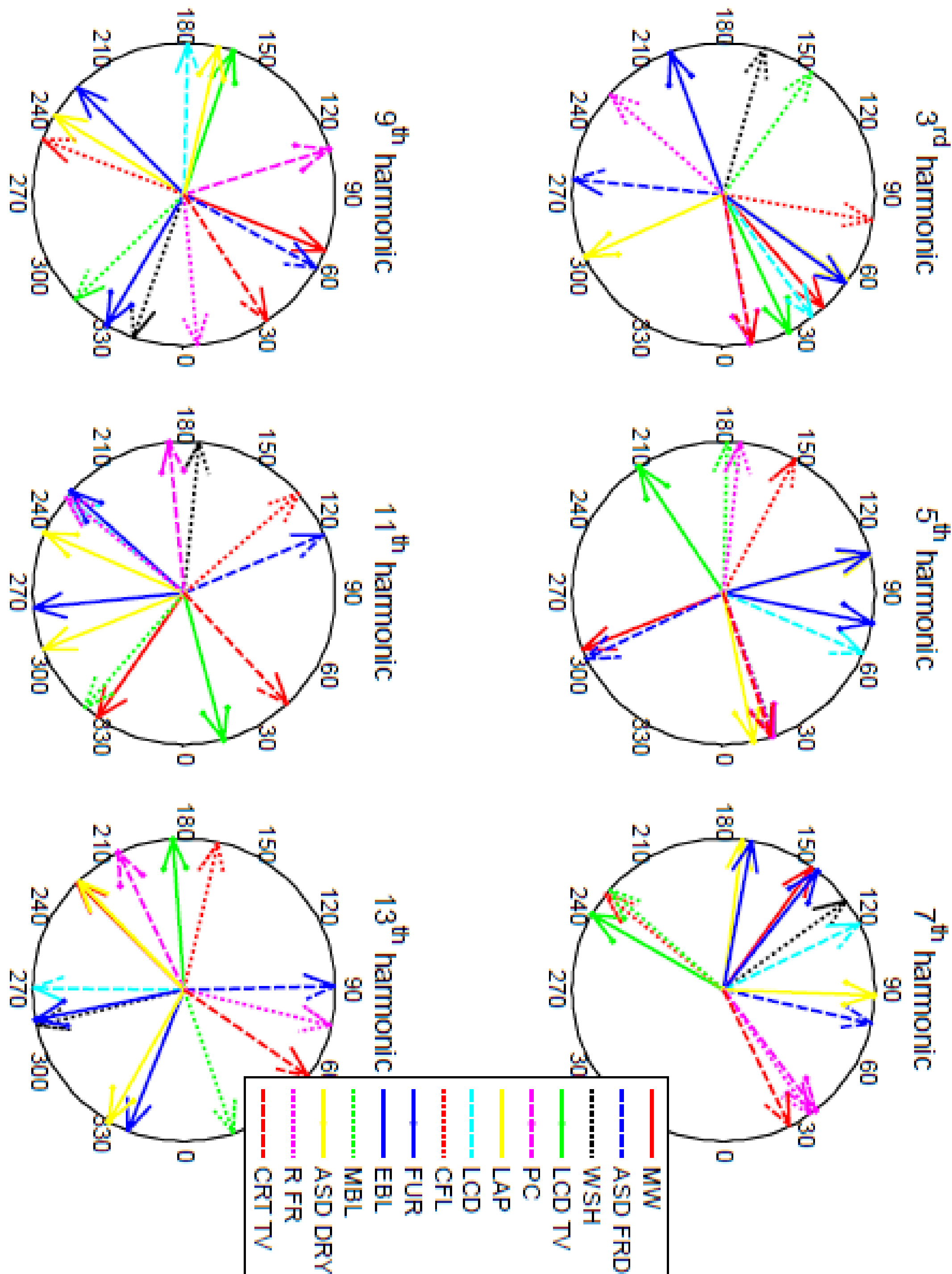

Desktop PC
Current [A]
Time step
PC 1
PC 3
PC 2


Microwave
Current [A]
Time step
MW 1 on
MW 1 off
MW 2 on
MW 2 off


CFL



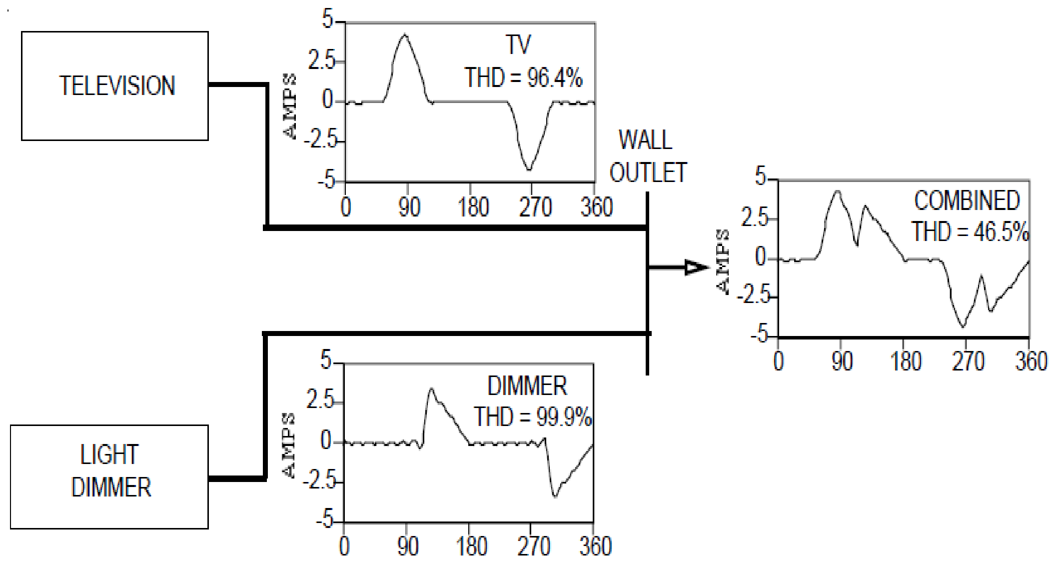
وبدراسة توافقيات هذه الأجهزة مع معظم الأجهزة المنزلية الأخرى ، ومع التركيز على التوافقيات التى لها قيمة واتجاه وليس قيمة فقط ، لوحظ وجود اختلاف بين كل الأجهزة في القيمة والزاوية للتوافقيات كما هو ملاحظ من الشكل التالي :



يلاحظ هنا اختلاف كل جهاز عن الآخر في زاوية التوافقية مما يفسر ظاهرة التلاشي cancellation

ولملاحظة التأثير الدقيق على التوافقيات قيمة واتجاه تم عمل دراسإ على جهاز تلفزيون من النوع LED و متحكم في الانارة light dimmer ودراسه كل جهاز فى حالة عمله منفصلا وفى حالة دمجهم.

تم ملاحظة التالي :



Harmonic	Television		Light Dimmer		Combined	
	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle
1	100.0 (1.20A)	1	100.0 (0.88A)	-50	100.0 (1.88A)	-20.3
3	79.8	-173	76.6	31	23.3	148
5	49.2	12	42.3	122	30.9	49
7	20.5	-159	21.1	-111	21.0	-138
9	4.0	81	21.2	20	11.4	31.3
11	5.5	-13	17.7	128	6.0	106
13	3.1	175	12.2	-108	6.2	-121
15	0.8	-138	11.7	20	5.0	17

أي عند دمج الأجهزة معا تقل التوافقيات نتيجة اختلاف زاوية التوافقيات ، لذا يفضل أن يتم تعريف التوافقيات بقيمة واتجاه وليس قيمة فقط.

30.9 مثال عملي آخر للحد من التوافقيات

فى المنظومات الصناعية ومع تزايد الاعتماد على variable speed drives وأشباهها من الأجهزة المنتجة للتوافقيات بكل رتبها أصبح التعامل مع هذه المشكلة ضروريا وأصبح أخذ قياسات دورية للتأكد من جودة القدرة شيئا أساسيا.

30.9.1 وصف المشكلة

فى هذا الجزء نقدم نموذجا لأحدى هذه الدراسات والتى تظهر فى الشكل حيث لدينا محولين قدرة كل منهما 750 kVA يتغذيان من BB B2 المتصل بمحول رئيسي قدرة 5 MVA مع وجود مكثفات لتحسين معامل القدرة كما فى الشكل 30-20.

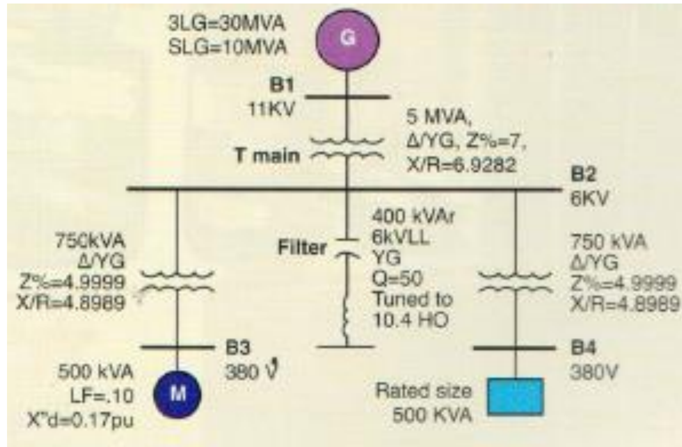


Figure 30-20

والأحمال المغذاة من المحولين الصغيرين تحتويأن على أجهزة Six Pulses Inverters وهذا يعنى أن التوافقيات من الرتب 5 و7 و11 موجودة بالموجات . وقد ثبت ذلك من تحليل موجات الجهد التى تظهر على BB-B2 والتى تظهر حجم التشوه فيها وكذلك فى التيار المار بالمحول الرئيسى فى الشكل 30-21 .

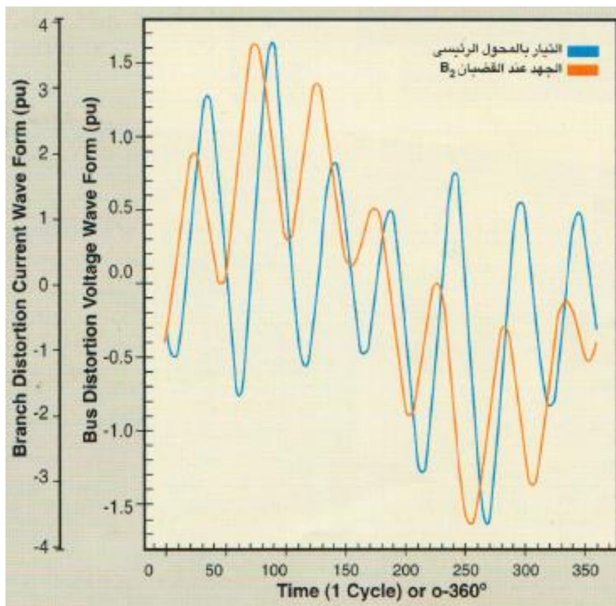


Figure 300-21

وباستخدام أجهزة تحليل القدرة Power Analyzer نحصل على قيم توافقيات الجهد والتيار ونسب التشوه لكل واحدة من هذه التوافقيات .

ومن الجدولين التاليين يتبين حجم التشوه الكبير لاسيما بالتوافقيات الـ 5 و 7 و11 وهى التوافقيات التى تجاوزت نسبة الـ 3% المسموح بها المواصفات.

جدول رقم (١): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2				
رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات(درجة)	التشوه (٪)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-		
٥	١٠٤٥,٠٣١	٧٦,٢٢	١٧,٦٤١	< ٣,٠٠٠
٧	٣٣٢٩,٩٣٨	٦٩,٣٥-	٥٦,٢١٢	< ٣,٠٠٠
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	< ٣,٠٠٠
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٣٢,٨٧٦	٢٤,٥٦	٠,٥٥٥	٣,٠٠٠
١٩	١٦,٠٤٦	١٤٩,٩١	٠,٢٧١	٣,٠٠٠
الجهد: ٦ ك ف – Vrms: ٦٨٧٨,٢٥ ف				
التشوه الكلي للجهد (THD%): ٥٩> – حد المواصفات القياسية: ٥٪				

جدول رقم (٢): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي				
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات(درجة)	التشوه (٪)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥		
٥	٣٨,٧٩٩	١٢,٧٦-	٨٣,٤٧٩	< ٧,٠٠٠
٧	٨٨,٣١٤	١٥٨,٦١-	١٩٠,٠١٧	< ٧,٠٠٠
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	< ٣,٠٠٠
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٣٥٩	٦٥,١٥-	٠,٧٧٣	٢,٠٠٠
١٩	٠,١٥٧	٦٠,١٧	٠,٣٣٧	٢,٠٠٠
الجهد: ١١ ك ف – التيار Irms: ١٠٧,١٢ أ – المعامل K: ٣٦,٨٨				
التشوه الكلي للتيار (THD%): ٢٠٧,٦٦> – حد المواصفات القياسية: ٨٪				

30.9.2 آليات الحل

وفى هذا المشروع تم تجربة تقليل أو حذف هذه التوافقيات عن طريقة محاولة جمع التوافقيات الصادرة من المحول الأول والثانى إتجاهيا ولكن بعد تغيير توصيلة أحد المحولين لتصبح Y/Y مؤرضة بدلا من Δ/Y مؤرضة ، والفكرة من وراء ذلك أن المحولين كانا متماثلين فى كل شئ وهذا يجعل التوافقيات المارة خلالها يتم جمعهما جبريا للتماثل فى القيمة والاتجاه ، فإذا تم تغيير توصيلة أحد المحولات فسينتج phase shift قدره 30 درجة ، كما فى الشكل 30-22. قارن هذا الشكل بالشكل السابق لترى كيف ساعد الـ phase shift فى حدوث نوع من الـ Cancellation للتوافقيات .

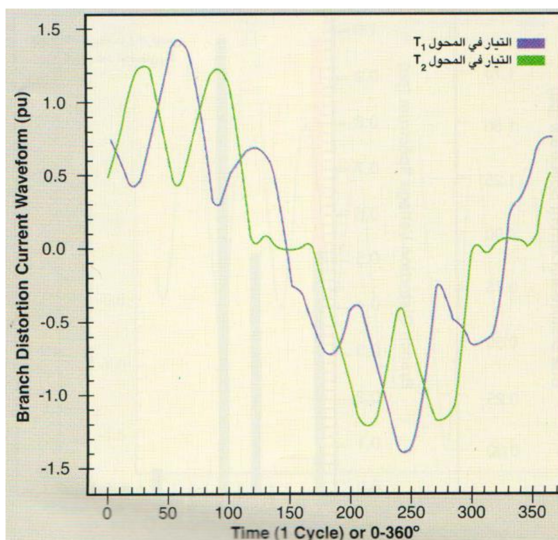


Figure 300-22

والنتيجة واضحة أكثر بعد إجراء دراسات جديدة بالـ Power Analyzer والتى تظهر نتائجها فى الجدولين التاليين.

واضح منهما أن نسب التشوه قد انخفضت بدرجة كبيرة اللهم سوى التوافقية رقم 11 التى لم تزل أعلى من المسموح لاسيما فى التيار. وأن كان من الممكن التخلص من هذا التجاوز البسيط بواسطة فلتر غير مكلف.

جدول رقم (٣): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2

رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات(درجة)	التشوه (٪)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-		
٥	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	< ٣,٠٠٠
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠

الجهد: ٦ ك ف – Vrms: ٥٩٢٦,٩٢ ف

التشوه الكلي للجهد (THD%): ٣,١٨ – حد المواصفات القياسية: ٥٪

جدول رقم (٤): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي

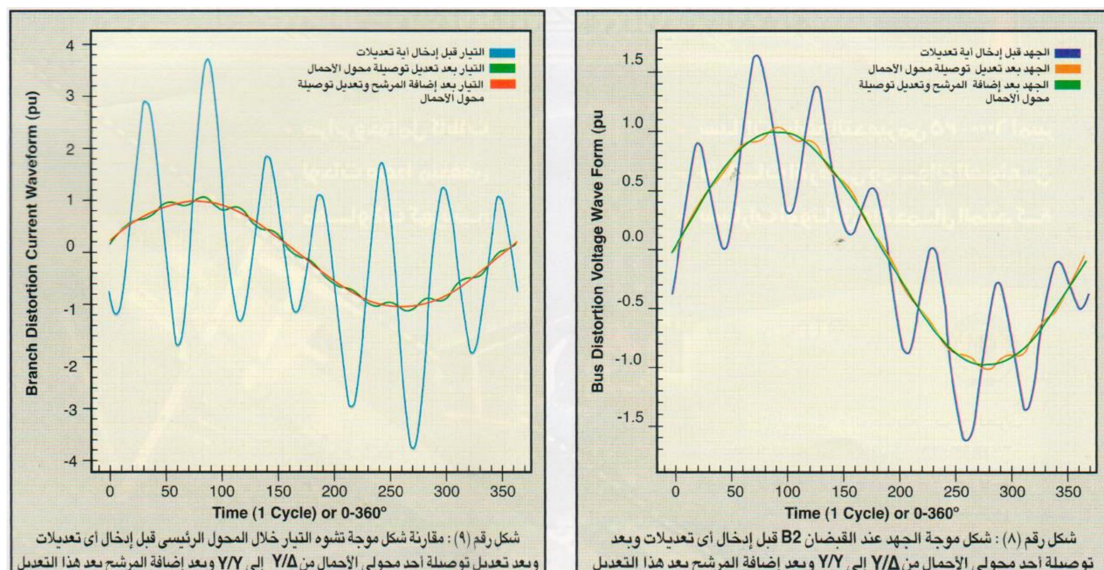
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات(درجة)	التشوه (٪)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥		
٥	٠,٠٠١	٧٧,٢٥	٠,٠٠٣	٧,٠٠٠
٧	٠,٠٠٣	١١١٠,٣٨	٠,٠٠٧	٧,٠٠٠
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	< ٣,٠٠٠
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٢٤,٨٧	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٢٩,٨٣-	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠

الجهد: ١١ ك ف – التيار Irms: ٤٦,٥٨ أ – المعامل K: ١,٥٦

التشوه الكلي للتيار (THD%): ٦,٧٥ – حد المواصفات القياسية: ٨٪

تجدر الإشارة إلى أن هذا الحل قد ساعد في تحسين جودة القدرة على BB B2 ، ولكن مازال كل من المحولين على حدة يعاني من تأثير التوافقيات داخلهما ، وبالتالي تقل كفاءة كل منهما ويمكن أن يتعرضا لمشاكل.

والشكل 30-23 يقارن بين شكل موجات الجهد والتيار الأصلين مقارنة بالشكل بعد مجرد تعديل توصيلة أحد المحولات كما رأينا وأخيرا الشكل بعد استخدام فلتر للتخلص من التوافقية الـ 11 .



شكل رقم (٩) : مقارنة شكل موجة تشوه التيار خلال المحول الرئيسى قبل إدخال أى تعديلات وبعد تعديل توصيلة أحد محولى الأحمال من Δ/Y إلى Y/Y وبعد إضافة المرشح بعد هذا التعديل

شكل رقم (٨) : شكل موجة الجهد عند القبضان B2 قبل إدخال أى تعديلات وبعد توصيلة أحد محولى الأحمال من Δ/Y إلى Y/Y وبعد إضافة المرشح بعد هذا التعديل

Figure 300-23

قاموس لبعض المصطلحات التي يكثر استخدامها

1	(Low Pressure	
2	Absulute Temprature	
3	Admittance	
4	Arcing Ground	
5	Arrestor	
6	Automatic Voltage Regulator	
7	Base Load	
8	Blackout	
9	blackstart	
10	Boiler	
11	Bruches	
12	Bundle Conductors	
13	Capacitance	
14	Capacitive Reactance	
15	Chimney	
16	Circulating current	
17	Combined cycle	
18	common service building	
19	COMMUNICATION	
20	compressor	
21	Condenser	
22	Dampers	
23	Demand Mangment	
24	Digital Protection	
25	Disc	
26	Distance realy	
27	Dry Transformer	

28	Economizer	
29	Electric Field	
30	Excitation	
31	Exciter	
32	Field Current	
33	fire fighting pump	
34	Flashover	
35	Flux Linkage	
36	Frequency	
37	Generator	
38	Governor	
39	Governor Valve	
40	Guard Rings	
41	Healthy Phases	
42	Heat Recovery Steam Generator, HRSG	
43	Impedance	
44	in operation	
45	in service	
46	Inductance	
47	Inductive reactance	
48	Infinite Bus Bar	
49	inverters	
50	Load Curve	
51	Load Demand	
52	Load Factor	
53	Load sharing	
54	Load Shedding	
55	Max Demand	
56	Mechanical Torque	
57	off load tap changer	
58	Open Circuit	

59	Parameters	
60	Partial Discharge	
61	Peak Load	
62	phase sequence	
63	phase shift	
64	Phases	
65	Power	
66	Power Angle	
67	power factors	
68	Power Loss	
69	Reactive Power	
70	Reactor	
71	Receiving End	
72	Rectifiers	
73	Reheater	
74	Resistive Loads	
75	reverse power relay	
76	Rotor	
77	Series Capacitors	
78	Shunt Capacitors	
79	Shunt reactors	
80	Single Line Diagram	
81	skin effect	
82	Spacer	
83	spark gap	
84	spinning reserve	
85	stability	
86	Stability limit	
87	Starting Motor	
88	Stator	
89	steam valve	
90	String	

91	Synchronized	
92	synchronous speed	
93	Tariff	
94	thermal limit	
95	Tidal	
96	Transients	
97	Travelling Waves	
98	turbine shaft	
99	Vents	
100	Voltage drop	
101	Voltage Gradient	
102		
103		
104		

قائمة المراجع

أهم المراجع العربية

1- كتب المؤسسة العامة للتعليم الفنى والتدريب – السعودية
2- كتب الأستاذ الدكتور عبد المنعم موسى
3- كتب الأستاذ الدكتور آسر زكى
4- كتاب الدكتور منير محمد مجاهد، مصادر الطاقة في مصر،1998
5- كتاب التوافقيات فى الشبكات الكهربية ، د كاميليا يوسف ، 2005
6- ملفات شركة مصر الوسطى لتوزيع الكهرباء – مركز تدريب الكوادر البشرية
7- محاضرات مركز تطوير الدراسات العليا والبحوث فى العلوم الهندسية
8- مجلة الكهرباء العربية
9- ملف عن اختبارات الكابلات للمهندس كامل بدرخان
10- ملف وسائل نقل القدرة ومحطات التوزيع للمهندس يسرى عبد السلام
11- تقارير ميدانية لطلاب السنة الرابعة بهندسة القاهرة (دفعة 2016)
12- التقرير السنوي لوزارة الكهرباء والطاقة.
13- مجلة وكيبديا للعلوم والمعرفة .

أهم المراجع الأجنبية

1- Electric Power Substation Engineering, 2nd Eddition, Edited by John D. McDonald, CRC press, 2007.
2- IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 1993
3- Power Plant Engineering, A.K.Raja, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006.
4- Principles of Power Systems, V.K. Mehta
5- Elements of Power System Analysis, William Stevenson, McGrow-Hill Publishing, 4th edition
6- Electrical Technology, B. L. Theraja, 2005
7- SUBSTATION GROUNDING, Inna Baleva, MASTER OF SCIENCE, 2012
8- IEEE Definition and Classification of Power System Stability, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004

9- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
10- Power quality / C. Sankaran, CRC Press, 2002.
11- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
12- Electrical Machines, Drives and Power Systems, T. Wildi, 6th edition, 2008.
13- Electrical energy conversion and transport : an interactive computer-based approach /George G. Karady, Keith E. Holbert. , IEEE press, Second edition, 2013.
14- HV Substation Design: Applications and Considerations, Dominik Pieniazek, P.E. Mike Furnish, P.E. IEEE CED, 2015

تم بحمد الله